APRIL 2006 · € 6,90 (D/A)

+++ BRENNPUNKT +++
VOGELGRIPPE

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

▶ **Streitgespräch:**
Wissenschaft und Religion

▶ **Tsunamis:**
Lehren aus der Katastrophe

www.spektrum.de

Das Echo der Schwarzen Löcher

Gleicht die Raumzeit einer Flüssigkeit?

HIRNFORSCHUNG
Wie Kinder Dinge von Bildern unterscheiden

EVOLUTION
Die ersten Beutegreifer

GOLFSTROM nature
Erlahmt Europas Wärmepumpe?

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,- €
4 194058 406900 04

Reinhard Breuer
Chefredakteur

An den Grenzen des Wissens

Liebe Spektrum-Leser,

Vogelgrippe allerorten: Inzwischen hat die Tierseuche fast ganz Europa erreicht. In unserem **»Brennpunkt Vogelgrippe«** wollen wir Ihnen dazu Hintergründe liefern: über letzte Analysen vom Ursprungsgebiet China, wo das Virus offenbar schon seit einem Jahrzehnt existiert; über die Wege und die Rolle des Vogelzugs, die Gefahren für Nutztiere sowie die Mittel zur Unterdrückung der Virenausbreitung im Körper (S. 28).

Zwei Intellektuelle beim neugierigen Blick über die Grenzen ihres Weltbilds: Der katholische Theologe Hans Küng und der Kosmologe Gerhard Börner trafen sich in Tübingen, um über das bisweilen heikle Verhältnis von Wissenschaft und Religion zu diskutieren. Hans Küng war ich im letzten Jahr bei einem Vortrag in Heidelberg begegnet, wo er über Schöpfung und ohne Berührungsängste auch über inflationäre Kosmologie gesprochen hatte. Kurz danach veröffentlichte er diese und verwandte Betrachtungen als Buch. Mit Gerhard Börner vom Max-Planck-Institut für Astrophysik verbindet mich meine Vergangenheit, da auch ich einst an diesem Institut gearbeitet hatte.

Das Gespräch, das, sozusagen über den Dächern der schwäbischen Gelehrtenstadt, im Wohnzimmer von Küng stattfand, berührte am Rand den Karikaturenstreit, der da noch tobte – dilettantisch provoziert, politisch instrumentalisiert. Küng, selbst Autor eines umfangreichen Buchs über den Islam, bezweifelte, ob hier lediglich ein aufgeklärtes Christentum mit einem unaufgeklärten Islam kollidiere: »Auch in Europa war die Aufklärung ein jahrhundertelanger Prozess.«

Börner mochte zwischen Islam und Christentum gleichfalls nur einen graduellen Unterschied erkennen: »Geht man in der Geschichte etwas zurück, dann war das Verhalten der christlichen Nationen eigentlich ähnlich.« Er gab sich optimistisch für die Zukunft, denn gerade die modernen Naturwissenschaften seien ja weit gehend unabhängig von kulturellen Prägungen. »Wenn ich eine Differenzialgleichung löse«, meinte der Astrophysiker, »dann ist es eigentlich egal, ob ich das als Muslim oder als Christ mache.«

Das Spannungsfeld zwischen Religion und Wissenschaft hat Spektrum auch schon früher beschäftigt (Spektrum 11/2005, S. 118; 6/2000, S. 82; 11/1989, S. 80). Im Dialog zwischen Küng und Börner kreisten die Gedanken eher um die Suche nach Gemeinsamkeiten – ohne das Trennende zu übersehen. Schwächen und Defizite des eigenen Fachgebiets wurden freimütig angesprochen, ebenso Stärken und Qualitäten der jeweils anderen Disziplin – ein für meinen Kollegen Götz Hoeppe und mich eher seltenes Erlebnis (S. 100).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

Wissen aus erster Hand

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Die Redaktion von spektrumdirekt informiert Sie online schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/info

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Xena größer als Pluto · Panzer mit Biowaffe · Urahn von T. Rex u. a.

13 **Bild des Monats**
Welche Farbe darf es sein?

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Erdähnlicher Exoplanet entdeckt** 🔊
Gravitationslinse offenbart kleinen Begleiter einer fernen Sonne

16 **Cello oder Flöte?** 🔊
Vorliebe für bestimmte Musikinstrumente ist im Gehirn verankert

22 **Blutkörperchen mit Turboantrieb** 🔊
Künstliche Geißel aus Magnetkügelchen taugt als Motor

23 **Dunkle Materie enhüllt**
Hypothetische Teilchen verraten sich durch Paarvernichtung

THEMEN

▶ BRENNPUNKT VOGELGRIPPE 28

29 **Der lange Weg der Vogelgrippe**

32 **Zugvögel unter Verdacht**

35 **Ansteckungsrisiko für Haustiere**

36 **Wie schnell gäbe es genügend Pandemie-Impfstoff?**

37 **Der gefährliche Typ H5N1**

38 **Wie wirken Grippemedikamente?**

▶ **40** TITELTHEMA GRAVITATION
Akustische Modelle Schwarzer Löcher

▶ **54** KOGNITION
Wie Kinder in Symbolen denken lernen 🔊

▶ **62** PALÄONTOLOGIE I
Uraltes marines Ökosystem – überraschend modern

70 PALÄONTOLOGIE II
Wann entstand die zweiseitige Körpersymmetrie?

▶ **74** NATURKATASTROPHEN
Lehrreicher Tsunami

88 ANTIKE KARTOGRAFIE
Griechische Weltkarte entzerrt

▶ **94** KLIMAFORSCHUNG
Wenn der Golfstrom erlahmt 🔊

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

SEITE 54

KOGNITIONSFORSCHUNG

Die Entwicklung des Symbolverständnisses

Dass ein Ding als Stellvertreter auf ein anderes Ding verweisen kann, müssen kleine Kinder erst mühsam lernen

PALÄONTOLOGIE

Ein frühes komplexes Ökosystem

SEITE 62

Hervorragend erhaltene chinesische Fossilien liefern Forschern verblüffende Einblicke in das marine Ökosystem vor rund 525 Millionen Jahren

Der älteste Bilaterier

SEITE 70

Tiere mit zweiseitiger Symmetrie wie der Mensch entstanden mindestens 50 Millionen Jahre früher als gedacht

SEITE 74

NATURKATASTROPHEN

Lehren aus dem Tsunami

Die Monsterwelle vom Dezember 2004 lieferte wertvolle Informationen, die künftig helfen werden, Menschenleben zu retten

+++ BRENNPUNKT +++ VOGELGRIPPE

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Siegeszug einer Seuche

SEITE 28

Eine Serie von Artikeln bietet Hintergrundinformationen zur Vogelgrippewelle, die nun auch Europa erfasst hat

Der lange Weg der Vogelgrippe **29**
Zugvögel unter Verdacht **32**
Ansteckungsrisiko für Haustiere **35**
Wie schnell gäbe es genügend Pandemie-Impfstoff? **36**
Der gefährliche Typ H5N1 ..... **37**
Wie wirken Grippemedikamente? **38**

TITELTHEMA GRAVITATION

SEITE 40

Der Klang Schwarzer Löcher

Physiker denken über akustische Modelle Schwarzer Löcher nach, die im Labor verwirklicht werden können. Sie versprechen sich davon neue Einsichten in die mikroskopische Struktur der Raumzeit

SEITE 88

ANTIKE KARTOGRAFIE

Weltkarte des Ptolemaios

Berliner Geodäten ist es gelungen, die Weltkarte des griechischen Gelehrten zu entzerren. Diese erweist sich als erstaunlich genau – und so erscheint die Leistung der antiken Landvermesser in einem neuen Licht

SEITE 94

KLIMAFORSCHUNG

Erlahmt der Golfstrom?

Komplizierte Meeresströmungen sorgen für mildes Klima in Europa. Gibt es erste Anzeichen dafür, dass dieses »atlantische Förderband« zum Stillstand kommt?

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 100

SPEKTRUM-GESPRÄCH

Gott und der Urknall

Der Kosmologe Gerhard Börner und der katholische Theologe Hans Küng diskutieren über Grenzgebiete von Wissenschaft und Religion

SEITE 118

ESSAY

Fossilien und Anti-Evolutionisten

Schon im 17. Jahrhundert schloss der britische Gelehrte Robert Hooke auf die Veränderlichkeit der Lebensformen – anhand von Muschelfossilien

APRIL 2006

▶ **100** SPEKTRUM-GESPRÄCH
Küng und Börner über Wissenschaft und Religion

▶ **118** ESSAY
Fossilien und die Evolutionsgegner

KOMMENTARE

21 **Glosse**
Alchemist in Norwegen

26 **Springers Einwürfe**
Die Gesellschaft als ideales Gas

WISSENSCHAFT IM …

53 **Rückblick:** Luxus-Süßstoff · Mechanisches Riesenhirn · Koksen im Kreißsaal u. a.

60 **Alltag:** Besser brennen – vom Vergaser zum Direkteinspritzer

JUNGE WISSENSCHAFT

84 **Lorbeerkranz für die schnellsten Algebraiker**
Internationale Mathematik-Olympiaden

REZENSIONEN

105 **Underwater Universe**
von C. und M. Hochleithner
Der Ursprung des Geistes von G. Marcus
Plattentektonik
von W. Frisch und M. Meschede
Kalte Herzen von P. Winterhoff-Spurk
Die Gleichungen der Physik von S. Bais
Nachgefragt: Philosophie
von C. Schulz-Reiss
Warum ich fühle, was du fühlst
von J. Bauer
Taschenlexikon der Pflanzen Deutschlands von R. Düll und H. Kutzelnigg

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

114 **Das Antiparallelogramm (I)**

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
8 **Leserbriefe/Impressum**
113 **Preisrätsel**
122 **Vorschau**

TITELBILD

Klänge aus dem Strudel eines Schwarzen Lochs stehen für den Versuch, mit akustischen Modellen gekrümmte Raumzeiten zu verstehen

Illustration: Kenn Brown

▶ DAS ZUSATZANGEBOT SPEKTRUM-PLUS FÜR ABONNENTEN FINDEN SIE AUF DER NÄCHSTEN SEITE

LESERBRIEFE

Lage des Perihels

Verhinderte der Mensch eine Eiszeit? Februar 2006

In diesem Beitrag wird im Zusammenhang mit einem gleich langen Klimazyklus mehrfach die Präzessionsperiode der Erdachse mit etwa 22 000 Jahren angegeben. Die Dauer eines Präzessionszyklus beträgt jedoch 25 800 Jahre. Wie aber kommt es dann zu der genannten Klimaperiode von 22 000 Jahren?

Für das Klima relevant ist unter anderem die Lage des Perihels der Erde relativ zur Jahreszeit. Berücksichtigung finden muss daher auch noch die im Artikel nicht erwähnte Periheldrehung der Erde (Verschiebung des sonnennächsten Punkts der Erdumlaufbahn) von etwa 11,7 Bogensekunden pro Jahr, was einer vollen Periode von ungefähr 110 000 Jahren (360·60·60/11,7) entspricht. Die Kombination dieser beiden Perioden bedeutet rechnerisch, den Kehrwert der Summe der Kehrwerte von 25 800 Jahren und 110 000 Jahren zu bilden. Dies führt auf rund 21 000 Jahre, etwa die beobachtete Länge der Klimaperiode.

Dr. Steffen Eckmann, Düsseldorf

Wille und Wissen

Februar 2006

Freiheitsbegriff dem Denkvorgang zuordnen

Die Einschätzung des Autors, mit dem Begriff der Willensfreiheit stimme etwas nicht, trifft wohl zu. Aber statt skeptischer Folgerungen, insbesondere wegen unvollständigen Wissens, sollte man nach einer plausibleren Lösung suchen. Meines Erachtens bezieht sich der Freiheitsbegriff nicht auf die Willensebene, sondern ist dem Denkvorgang, dem Bewusstsein zuzuordnen.

Um dies näher zu erläutern, möchte ich vereinfachend von einem Reiz-Reaktionsverhältnis ausgehen: Der Wille ist die kausale Reaktion auf einen Reiz, wobei Reiz- und Motivationsstärke für die Auslösung der Reaktion verantwortlich sind. Die Freiheit des Bewusstseins besteht nun darin, dieses kausale Schema zu erweitern und Alternativen zum ursprünglichen Auslösungsmechanismus anzubieten. Dies wird ermöglicht durch die Abstandnahme, mit der das Bewusstsein Reiz und Motivation gegenübertritt.

Übt nun eine bestimmte Alternative eine stärkere Reaktionsbereitschaft aus als andere, wird die Willensbetätigung nach der Unterbrechung durch die distanzierende Bewusstseinsfunktion wieder kausal fortgeführt. Bisher hatte man Wille und Gedanken miteinander gekoppelt und damit den Freiheitsgedanken auf der Willensebene verankert. Nicht zu wenig, sondern mehr Wissen ist also die Folge einer gedanklichen Freiheit.

Dr. Eckart Lefringhausen, Geldern

Zusammenwirken von Wünschen und Überlegungen

Wir handeln aus dem Zusammenwirken von Wünschen und Verstandesüberlegungen, das heißt, mein Wille bildet sich im Zusammenhang der jeweiligen Entscheidungssituation auf Grund meiner Anlage und Biografie mit dem Verstand als Werkzeug meiner Wünsche und Motive unter Nutzung des mir zugewachsenen Wissens und der abgespeicherten emotionalen Erfahrungen. Dabei habe ich die Möglichkeit, in Übereinstimmung mit den Resultaten meiner Wünsche und meiner Verstandesüberlegungen zu handeln.

Demnach kann ich mich nur insofern als frei empfinden, als ich frei von Zwängen handele, obwohl ich gleichzeitig um die Determiniertheit des Vorgangs weiß und dies mir bei jedem Nachdenken über die Gründe meiner Entscheidung auch meistens bewusst wird.

Statt von Determiniertheit würde ich allerdings mit Rücksicht auf die Konsequenzen der Quantenmechanik lieber von zufallsgebrochener Determination sprechen. Mit Willensfreiheit hat dieses Gefühl aber nichts zu tun. Sie bliebe gemäß meiner Darstellung eine Illusion.

Da meine Entscheidungen aus einem Prozess hervorgehen, der zwischen meinen Wünschen und verstandesmäßigen Überlegungen abläuft, erfahre ich mich trotz vorhandener Determination nicht als einen Automaten. Vielmehr empfinde ich mich als ein in Wechselwirkung mit der Umwelt stehendes innerlich aktives, entscheidungs- und bewusstseinsfähiges Wesen.

Dr. Ruprecht Kampe, Marburg

Unpräzise Begrifflichkeit

Ich bin immer wieder erstaunt, wie unpräzise auch Naturwissenschaftler in ihrer Begrifflichkeit werden, wenn sie über philosophische Themen schreiben. Da werden Begriffe wie Freiheit, Wirklichkeit oder Wissen verwendet, als wäre es völlig klar, was darunter zu verstehen ist. Als Beispiel diene folgender Satz: »Wir aber sind genötigt, auf Grund unvollständigen Wissens zu handeln.« Ich bin überzeugt, der Autor bekäme schon Schwierigkeiten, wenn man ihn bitten würde, den Begriff »Wissen« zu definieren. Aber mit Sicherheit könnte er nicht sagen, wie man vollständiges von unvollständigem Wissen unterscheiden kann.

Trotzdem würde ich es begrüßen, öfter Artikel über philosophische Themen zu lesen, zum Beispiel über erkenntnistheoretische Grundlagen der Naturwissenschaften.

Thomas Kandlbinder, Hamburg

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Sitzt unser Geist – und mithin unser vermeintlich freier Wille – eingesperrt im Käfig eines ehernen Determinismus?

Der Mensch, Version 2.0

Januar 2006

Nicht die Menge macht's

Diesen Artikel habe ich als Arzt mit Aufmerksamkeit gelesen. Wissenschaftlich ist der Inhalt völlig haltlos, weil der Autor singulär davon ausgeht, dass die Menge an verfügbarer Information in biologischen Systemen das alleinig Bestimmende sei. Er vernachlässigt dabei, dass bei biologischen Systemen aber Präsentation, Bündelung und zeitgerechtes Abgreifen von Information mindestens ebenso wichtig sind. Hat doch ge-

rade die Arbeit am humanen Genomprojekt gezeigt, dass es nicht die Menge an Informationen ist, die den Menschen ausmacht, sondern die Intelligenz der Organisation der Information.

Über Beständigkeit bei gleichzeitiger Wandelbarkeit an Information, die in der Biologie wichtig sind, kann jemand, der nur fünfzig Jahre ins Visier nimmt, nicht mitreden. Daher ist dieser wichtige Aspekt ausgespart.

Besonders im zweiten Teil geht der Fortschrittsglaube über das Maß hinaus.

Hoffen wir, dass selbst wenn die beschriebenen Szenarien möglich würden, ein gesellschaftlicher Konsens diese so nicht erlauben möge.

Prof. Ekkehard Döhring, Raisdorf

Exponentiell wachsendes Risikopotenzial

Was Ray Kurzweil über die ständige Zunahme der Veränderungen sagt, ist bedenkenswert und richtig. Inwieweit seine Voraussagen stimmen, ist allerdings eine andere Frage. Die Trefferquote bei so detaillierten Spekulationen war noch nie sehr hoch. Am Beispiel des Schachcomputers konnten wir sehen, dass die exponentielle Zunahme der Rechenkapazität noch lange keine vergleichbare Zunahme der Spielstärke bringt. Trotz des Aufwands, der dafür getrieben wurde, ging es zäh und langsam voran.

Aus dieser Sicht erscheinen Kurzweils Prognosen überoptimistisch und auch ziemlich erratisch. Insbesondere fehlt der am nächsten liegende Aspekt völlig. Exponentielles Wachstum des technischen Potenzials bringt doch auch exponentielles Wachstum des Risikopotenzials. Eingedenk der Tatsache, dass Zerstören leichter als Aufbauen ist, folgt zwanglos die Voraussage: Um fatale Risiken zu vermeiden, müssen wir den globalen Überwachungsstaat einrichten. Dieser Aspekt dürfte tiefgreifender auf unsere zukünftige Entwicklung einwirken als die von Kurzweil skizzierten Umwälzungen.

Dr. Wilfried Müller, Unterföhring

KI-Systeme kontrollieren und nutzen

Der Autor ist nicht nur extrem optimistisch mit seinen Prognosen, sondern auch extrem mutig. Obwohl andere Wissenschaftler seine Ideen als populistisch und unverantwortlich darstellen, finde ich die von ihm genannten, bis heute entstandenen Entwicklungen sehr beeindruckend und glaube, dass mehr seiner Prognosen sich bewahrheiten werden, als die meisten glauben.

Doch für mich ist die eigentlich spannende Frage nicht, wann und wie weit uns KI-Systeme auf kognitiv-intellektueller Ebene überflügeln, sondern welche emotionale (R)Evolution sie durchmachen werden.

Ich behaupte, dass KI-Systeme niemals am Schreibtisch sitzen, Kaffee trinken und dabei Musik genießen werden. Dieser Vorteil des Prozesses Fühlen - Denken - Handeln wird bei den ursprünglich-biologischen Systemen bleiben. Ich wähle diesen Begriff bewusst, da Mensch-Maschine-Schnittstellen als Hybrid-Modelle oder auch »Mensch Version 2.0« zwangsläufig ein Bindeglied zwischen der biologischen und nichtbiologischen Intelligenz einnehmen werden. Ich bin überzeugt, dass wir die weitaus komplexeren und intelligenteren Denken - Handeln - Prozesse und damit die GNR-Revolution kontrollieren und positiv nutzen können, wenn wir uns den Vorteil der emotionalen Intelligenz zu Nutze machen.

Der Missbrauch solcher zukünftigen KI-Systeme ist weder heute noch morgen aufzuhalten und die Kluft zwischen Reichen und Armen wird auch nicht geschmälert werden.

Max Fabian Karl Happel, Magdeburg

Chiralität in Kriminalromanen

Asymmetrische Eselsohren, Forschung aktuell, Februar 2006

Das Phänomen der Chiralität und die Schwierigkeiten, rechts- oder linksdrehende Moleküle rein herzustellen, beschäftigen nicht nur die Wissenschaft, sondern haben auch schon früh Einzug in die Kriminalliteratur gehalten.

Im Roman »The Document in the Case« (deutsch »Der Fall Harrison«) von D. L. Sayers aus dem Jahr 1930 wird der Bösewicht als Mörder überführt, indem nachgewiesen wird, dass das Opfer das Pilzgift Muscarin als Racemat aufgenommen hat, also als optisch inaktive Mischung von links- und rechtsdrehender Form. Hätte er sich versehentlich mit einem Fliegenpilz vergiftet, wie es zunächst den Anschein hatte, hätte das Muscarin in optisch aktiver Form vorliegen müssen. So aber musste es sich um künstlich hergestelltes Muscarin und mithin um einen Giftmord handeln. Die Grundlagen und die Nachweistechnik (mit drehbaren Polarisationsfiltern) werden im Roman relativ detailliert beschrieben.

Manfred Polak, München

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Hermann Englert, Dr. Gabriele Herbst, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Frank Scholz, Dr. Michael Springer.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, D-70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01.01.2006.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2006 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.
ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

ARCHÄOLOGIE

Neue Funde in Luxor

Eigentlich glaubten die Archäologen, im Umkreis Luxors gäbe es nichts Bedeutendes mehr zu entdecken. Doch nun kamen innerhalb weniger Wochen gleich drei spektakuläre neue Funde ans Licht. Schon im Januar stießen Wissenschaftler der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) bei Ausgrabungen im Karnak-Tempel von Luxor auf eine gut erhaltene, 1,60 Meter hohe Statue aus schwarzem Granit. Sie stellt die Gemahlin von Amenophis III. und Mutter des berühmten Echnaton dar. Im Tempel ihres Gatten fanden Forscher um Hourig Sourouzian vom Deutschen Archäologischen Institut (DAI) kurz danach auch den riesigen Kopf einer Statue aus rosafarbenem Granit von dem Pharao selbst. Die größte Überraschung erlebten jedoch wohl Otto Schaden und seine Mitarbeiter von der Universität Memphis: Bei Arbeiten um das Grab des Amenmeses im Tal der Könige entdeckten sie einen Schacht, der zu einer bisher unbekannten Totenkammer führte. Dort befanden sich sieben hölzerne Sarkophage mit aufgemalten Gesichtern sowie 27 Ton- und Alabasterkrüge. Möglicherweise sind in der Kammer Angehörige des Hofstaats aus der 18. Dynastie bestattet, zu der auch Tutenchamun zählte. Dessen Grab ist nur knapp 25 Meter entfernt.

Pressemitteilung der Universität Memphis

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Aus rosafarbenem Granit ist der kürzlich entdeckte Kopf einer Kolossalstatue von Amenophis III.

PHYSIK

Chaos mit System

Seit Jahrzehnten schon streiten die Physiker über die richtige Beschreibung von Turbulenzen. Nach der gängigen Theorie, die von dem Briten Lewis Fry Richardson stammt und seit über 80 Jahren für viele naturwissenschaftlich-technische Berechnungen verwendet wird, hängt die Geschwindigkeit, mit der sich benachbarte Partikel in chaotischen Verwirbelungen voneinander entfernen, nicht von ihrem ursprünglichen Abstand ab. In den 1950er Jahren stellte der Australier George Batchelor allerdings eine Formel auf, bei der genau dies – zumindest am Anfang – der Fall ist.

Jetzt gelang es endlich, die alte Streitfrage experimentell zu klären. Ein internationales Physikerteam um Eberhard Bodenschatz vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen filmte dazu die Bewegungen von Styroporkügelchen in einer turbulenten Wasserströmung mit drei Hochgeschwindigkeitskameras, die 25000 Aufnahmen pro Sekunde machten. In Verbindung mit einem sehr hellen Laser ließ sich dabei die Bewegung einzelner Teilchen und ihr Abstand zueinander direkt verfolgen. Das Ergebnis bestätigte die Theorie von Batchelor. Außerdem zeigte sich, dass der Abstand der Teilchen langsamer zunimmt als bisher vermutet. Damit sollten sich turbulente Vorgänge auf den verschiedensten Gebieten – von der Meteorologie über Verbrennungsprozesse bis zu den Vorgängen im Inneren von Sternen – nun genauer modellieren lassen. *Science, 10.2. 2006, S. 835*

EBERHARD BODENSCHATZ, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION, GÖTTINGEN

Mit einem Laser und drei Hochgeschwindigkeitskameras verfolgten Forscher einzelne Styroporkügelchen in einer turbulenten Wasserströmung.

SYMBIOSE

Panzer mit Biowaffe

Blattschneiderameisen ernähren sich von einem Pilz, den sie in eigens angelegten Kammern auf selbst produziertem Humus züchten. Dieser Leckerbissen schmeckt aber nicht nur ihnen. Auch der parasitische Mikropilz *Escovopsis* macht sich mit Vorliebe darüber her. Um diesen Räuber fern zu halten, greifen die Ameisen zu einem ungewöhnlichen Mittel: Sie tragen auf ihrem Chitinpanzer Bakterien einer Actinomyceten-Gattung, die ein Antibiotikum gegen den Parasiten produzieren. Doch das ist noch nicht alles. Wie eine Gruppe um Cameron Currie an der Universität von Wisconsin in Madison nun herausgefunden hat, halten die Ameisen die Bakterien regelrecht wie Haustiere. Sie bieten ihnen ein wohnliches Plätzchen in speziellen Ausbuchtungen – so genannten Krypten – in ihrem Chitinpanzer und füttern sie über exokrine Drüsen. Currie hat nachgewiesen, dass alle pilzzüchtenden Ameisen – und nur sie – solche Untermieter beherbergen. Bei der stammesgeschichtlich ältesten

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

PLANETOLOGIE

Xena sticht Pluto aus

FRANK BERTOLDI, UNIVERSITÄT BONN

2003 UB 313 (links) im Größenvergleich mit Pluto, Charon, der Erde und dem Mond

Schon Anfang 2005 entdeckte eine Gruppe von Astronomen jenseits der Plutobahn einen Himmelskörper namens 2003 UB 313, für den sie den Status des zehnten Planeten reklamierte. Anhand seiner Helligkeit im sichtbaren Spektralbereich ließ sich die Größe des inoffiziell auch Xena genannten Objekts aber nur sehr grob abschätzen. Immerhin sprach einiges dafür, dass es nicht viel kleiner sein sollte als Pluto.

Nun haben Frank Bertoldi vom Radioastronomischen Institut der Universität Bonn und seine Mitarbeiter die exakte Größe bestimmt. Sie beobachteten Xena mit einem Radioteleskop, das mit einer infrarotempfindlichen Kamera ausgestattet war. Damit konnten sie die von dem Körper abgegebene Wärmestrahlung messen. In Verbindung mit den optischen Helligkeitsdaten ließ sich so der Durchmesser berechnen. Er beträgt demnach rund 3000 Kilometer – etwa 700 Kilometer mehr als der von Pluto. Damit ist klar, dass Xena den gleichen Rang beanspruchen kann: Entweder ist sie auch ein Planet oder Pluto muss zum transneptunischen Objekt herabgestuft werden.

Nature, 2.2. 2006, S. 563

PALÄONTOLOGIE

Urahn von T. Rex

Ein internationales Forscherteam um Xu Xing vom Institut für Paläontologie und Paläoanthropologie in Peking hat in der Wüste Gobi zwei Exemplare eines Vorfahren von *Tyrannosaurus rex* entdeckt. Der bislang älteste Verwandte des gefürchteten Raubsauriers zeichnet sich durch einen großen, mit Luft gefüllten Nasenkamm aus, weshalb seine Entdecker ihn auf den Namen *Guanlong wucaii* getauft haben – übersetzt etwa »gekrönter Drache des fünffarbigen Felsens«.

Wozu der etwa drei Meter große Drache seine »Krone« benötigte, ist nicht ganz klar. Möglicherweise, so vermuten die Forscher, diente sie zur Werbung um Sexualpartner – wie etwa heute das gleichfalls imposante, aber eher hinderliche Hirschgeweih.

Die beiden in der autonomen Region Xinjiang ausgegrabenen Tyrannosauroiden lebten offenbar schon vor 160 Millionen Jahren im späten Jura – 90 Millionen Jahre vor *T. rex*. Der größere war zum Todeszeitpunkt etwa zwölf Jahre alt und damit voll ausgewachsen; der kleinere befand sich mit seinen etwa sechs Jahren noch in der Jugendphase. Das ermittelten die Wissenschaftler durch Untersuchung des Wadenbeinschafts. *G. wucaii* wurde bis zu zwanzig Jahre alt. Mit seinen langen, kräftigen Beinen dürfte er Geschwindigkeiten um die fünfzig Kilometer pro Stunde erreicht haben. *Nature, 9.2. 2006, S. 715*

AINSLIE LITTLE

▼ Am Kopf dieser Blattschneiderameise erscheinen die Ansammlungen von Antibiotika produzierenden Bakterien als weiße Flecken.

Spezies hausen die Helfer noch direkt auf der Haut unter dem vordersten Beinpaar. Bei den meisten Blattschneiderameisen leben sie dagegen in Vertiefungen, die sich auf den Brustbereich konzentrieren. Das stellt sicher, dass sie beim Pflegen der Pilzkultur mit ihr in Berührung kommen und das Antibiotikum darauf hinterlassen.

Science, 6.1. 2006, S. 81

ZONGDA ZHANG / IVPP

▲ Der nun entdeckte älteste bekannte Vorfahre von *Tyrannosaurus rex* trug einen Nasenkamm.

TIM J. SCHULZ, UNIVERSITÄT JENA

Der große Tumor in der linke Körperhälfte dieser Nacktmaus entstand aus normalen Krebszellen, die sehr viel kleinere Geschwulst rechts aus solchen mit künstlich gesteigerter Zellatmung.

MEDIZIN

Zellatmung hemmt Tumorwachstum

Nach über achtzig Jahren bewies ein deutsches Forscherteam jetzt eine Hypothese, die schon 1924 der Medizin-Nobelpreisträger Otto Heinrich Warburg aufgestellt hatte. Demnach gewinnen Krebszellen – ähnlich wie Bakterien – ihre Energie primär durch die eher primitive Gärung und nicht wie normale Körperzellen durch das effizientere Verbrennen mit Sauerstoff. Erstaunlicherweise verlieren Geschwulste sogar ihre Fähigkeit zu wachsen, wenn sich dieses Verhältnis umkehrt. Das demonstrierte ein Team um Michael Ristow an der Universität Jena, indem es Krebszellen aus Dickdarmkarzinomen dazu brachte, mehr oxidativen Stoffwechsel zu betreiben, und sie in Nacktmäuse mit defektem Immunsystem injizierte. Die daraus entstehenden Karzinome waren viel kleiner als die aus unbehandelten Krebszellen, welche die Forscher zur Kontrolle in eine andere Körperstelle gespritzt hatten.

Die vermehrte Zellatmung erreichten Ristow und seine Mitarbeiter, indem sie gentechnisch die Konzentration des Proteins Frataxin in den Zellen erhöhten. Zwar ist die genaue Funktion dieses Eiweißstoffs noch ungeklärt; frühere Studien haben aber ergeben, dass es den oxidativen Stoffwechsel fördert. Die Resultate der Jenaer Forscher könnten neue Wege in der Krebstherapie eröffnen.

Journal of Biological Chemistry, 13. 1. 2006, S. 977

ASTRONOMIE

Lebensbausteine im Sternenstaub

Wie ist das Leben auf der Erde entstanden? Niemand weiß das bisher ganz genau. Aber eines scheint klar: Acetylen und Cyanwasserstoff müssen eine wichtige Rolle gespielt haben. Denn sie können mit Wasser Grundbausteine des Lebens bilden, insbesondere die DNA-Base Adenin und einige der Aminosäuren, aus denen die Proteine bestehen. Nun hat ein internationales Forscherteam um Fred Lahuis vom Observatorium Leiden (Niederlande) mit dem Spitzer-Infrarot-Teleskop auch in der Umgebung des Sterns IRS 46 große Mengen Acetylen und Cyanwasserstoff sowie andere Kohlenstoffverbindungen entdeckt. Diese junge Sonne liegt etwa 375 Lichtjahre von der Erde entfernt im Sternbild »Schlangenträger« und ist von einer riesigen Staubwolke umgeben, aus der sich im Lauf der Jahrmillionen Planeten bilden könnten. Da die spektroskopisch entdeckten kohlenstoffhaltigen Gasmoleküle etwa 100 Grad Celsius heiß sind, müssen sie sich ziemlich nahe am Stern befinden – maximal im sechsfachen Abstand der Erde von der Sonne.

Es ist das erste Mal, dass Acetylen und Cyanwasserstoff in einer stellaren Staubscheibe außerhalb unseres Planetensystems nachgewiesen wurden. Mit dieser Entdeckung steigt die Wahrscheinlichkeit für außerirdisches Leben.

The Astrophysical Journal Letters, 10. 1. 2006, S. 145

NASA, JPL / CALTECH / SSC, T. PYLE

In der Staubscheibe eines fernen jungen Sterns – hier in künstlerischer Darstellung – haben Astronomen zwei Vorläufermoleküle des Lebens entdeckt.

MATHEMATIK

Das Gesetz des Reisens

Seuchen können sich heutzutage blitzschnell ausbreiten. Der Grund ist die stetig wachsende Mobilität der Menschen. Um die Verbreitung von Krankheiten vorhersagen zu können, müsste man deshalb das allgemeine Reiseverhalten kennen. Dafür aber wären sämtliche Verkehrsbewegungen auf der Welt, ob mit dem Fahrrad, dem Auto, der Bahn oder dem Flugzeug, über einen längeren Zeitraum zu erfassen – eine praktisch unmögliche Aufgabe. Deutschen Wissenschaftlern ist es dennoch gelungen, die Gesetzmäßigkeiten des menschlichen Reiseverhaltens herauszufinden.

Dirk Brockmann und Kollegen am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen nutzten dafür die Daten des amerikanischen Internetportals www.wheresgeorge.com, bei dem Menschen ihre Banknoten registrieren lassen und deren weiteren Verbleib verfolgen können. Insgesamt 500 000 Datensätze wertete das Team aus.

Wanderrouten von Dollarnoten in den USA

DIRK BROCKMANN, MPI FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION

Dabei entdeckte es, dass sich die Verbreitung von Geldscheinen mit ähnlichen Gleichungen beschreiben lässt wie die Verwirbelung von Teilchen in turbulenten Strömungen. Demnach macht jede Banknote erratische Sprünge, die einem »skaleninvarianten Potenzgesetz« mit nur zwei Parametern gehorchen; der eine berücksichtigt die variable Verweildauer an einer Stelle, während der andere die Häufigkeitsverteilung der Sprunglängen zum nächsten Ort beschreibt. Da Krankheitskeime wie Geldscheine von Mensch zu Mensch weitergegeben werden, eignen sich die Formeln auch zur Vorhersage der Ausbreitung von Seuchen.

Nature, 26. 1. 2006, S. 462

Mitarbeit: Sonja Huhndorf und Stephanie Hügler

Welche Farbe darf es sein?

Umweltfaktoren können die Erscheinungsform eines Tiers drastisch verändern. So werden die Raupen des Tomatenschwärmers bei 28 °C grün und bei 20 °C dunkelbraun. Wie hat sich diese so genannte Polyphänie entwickelt? Yuichiro Suzuki und H. Frederic Nihout von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) konnten den Vorgang nun experimentell nachvollziehen – beim Tabakschwärmer, dessen Raupen immer grün sind. Allerdings gibt es eine seltene Mutante mit braunen Larven, die auf sehr starke Hitzereize von über 32 °C hin zumindest teilweise ergrünen können. Die Forscher kreuzten nun jeweils braune Tiere, die am stärksten auf Hitze reagierten. Nach 13 Generationen erhielten sie so eine Linie von Faltern, die wie die Tomatenschwärmer bei 28 °C grün wurden *(Science, 3.2.2006, S. 650)*. Die Forscher sehen darin ein allgemeines Modell für die bisher kaum verstandene Evolution von Polyphänie. Demnach erhöht zunächst eine Mutation die Empfindlichkeit gegenüber dem Umweltreiz. Dann greift die Selektion ein, passt die Reaktionsschwelle weiter an und macht sie höher und steiler.

SCIENCE

ASTRONOMIE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Erfolg bei der Suche nach erdähnlichen Planeten

Mit Hilfe des Gravitationslinseneffekts ist es erstmals gelungen, einen ziemlich kleinen extrasolaren Planeten aufzuspüren, der seinen Mutterstern in recht weitem Abstand umkreist.

Von Joachim Wambsganß

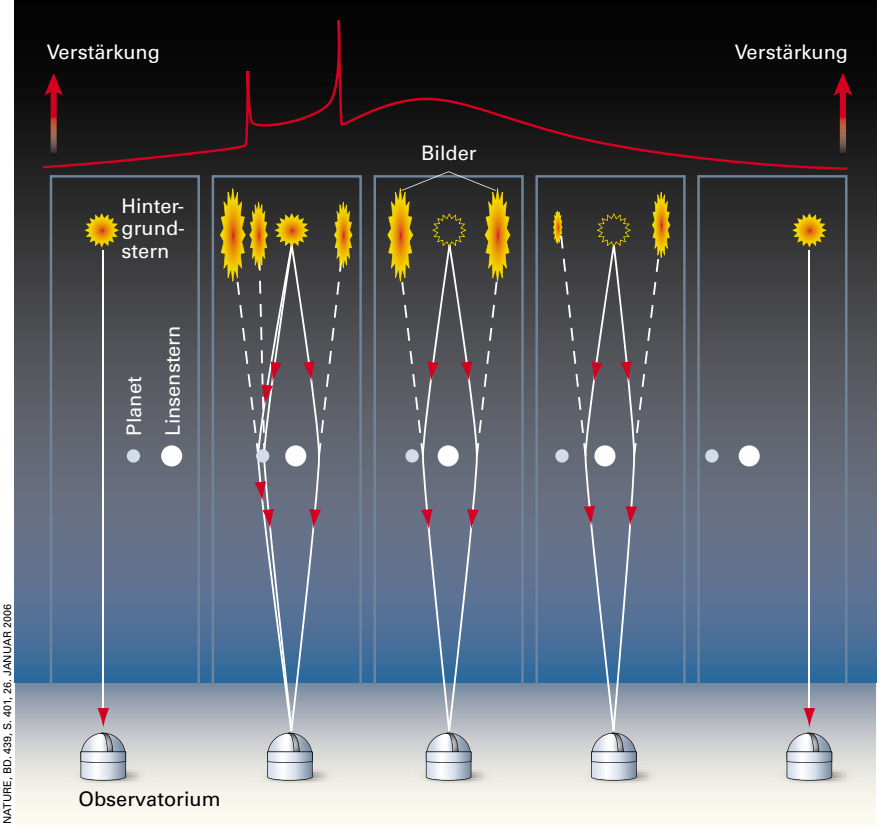
Die meisten der bisher bekannten 180 Planeten um ferne Sonnen haben relativ große Massen ähnlich der von Jupiter und bewegen sich auf engen Bahnen um ihre Zentralsterne. Aus diesem Grund werden sie »heiße Jupiter« genannt. Leben oder gar außerirdische Zivilisationen dürfte es auf ihnen kaum geben. In dieser Hinsicht sind Exoplaneten interessanter, die eine kleinere Masse haben und nicht so dicht um ihre »Sonne« kreisen. Sie lassen sich mit herkömmlichen Suchmethoden, bei denen die Astronomen nach Wackelbewegungen oder Verdunklungen der betreffenden Muttersterne fahnden, allerdings kaum aufspüren. Nur bei großen Planetenmassen und kleinen Umlaufbahnen sind derlei Störungen so deutlich, dass man sie heutzutage messen kann.

Schon seit etlichen Jahren wendet das »PLANET-Team« (nach *Probing Lens Anomaly Network*) – ein Zusammenschluss von etwa dreißig Wissenschaftlern aus zehn Ländern – daher eine andere Suchmethode an. Dabei arbeitet es gleichsam mit kosmischen Vergrößerungsgläsern: so genannten Gravitationslinsen. Nun konnte die Gruppe den ersten bedeutenden Erfolg vermelden: die Entdeckung eines Planeten, der etwa die 5,5-fache Masse und den 2,6-fachen Bahnradius der Erde hat *(Nature, 26. 1. 2006, S. 437)*. Damit handelt es sich um den »erdähnlichsten« unter allen bisher bekannten Exoplaneten. Allerdings liegt seine geschätzte Oberflächentemperatur mit minus 220 Grad Celsius sehr viel niedriger als selbst die unseres kalten Nachbarn Mars.

Schon 1991 haben Shude Mao und Bohdan Paczynski von der Universität Princeton (New Jersey) den Vorschlag gemacht, mit der Gravitationslinsenmethode nach Planeten zu suchen. Das auch Microlensing genannte Verfahren

Wie auf dieser Zeichnung könnte der Planet OGLE-2005-BLG-390-Lb aussehen.

ESO



NATURE, BD. 439, S. 401, 26. JANUAR 2006

Ein Stern, der vor einem leuchtenden Hintergrundobjekt vorbeizieht, fokussiert dessen Lichtstrahlen und bewirkt so einen vorübergehenden Anstieg der Helligkeit. Hat er einen Planeten, können in der normalerweise symmetrischen Lichtkurve Zacken auftreten.

basiert auf einer Vorhersage Einsteins: Lichtstrahlen werden durch die Gravitationswirkung massereicher Sterne wie Materie angezogen und dadurch abgelenkt. In den meisten Fällen ist dieser Effekt zwar unmessbar klein. Wenn aber ein Stern von uns aus gesehen vor einem leuchtenden Hintergrundobjekt vorbeizieht, fokussiert er dessen Lichtstrahlen wie eine Linse auf die Erde und sorgt so für einen kurzzeitigen Anstieg der Helligkeit.

Zunahme und Abfall der Lichtintensität sind mathematisch exakt berechenbar – die maximale Verstärkung hängt nur vom minimalen Winkelabstand zwischen Linse und Hintergrundobjekt ab. Ein Einzelstern verursacht dabei eine symmetrische Glockenkurve. Hat er aber einen Planeten als Begleiter, kann die Lichtkurve einen oder mehrere zusätzliche Zacken aufweisen.

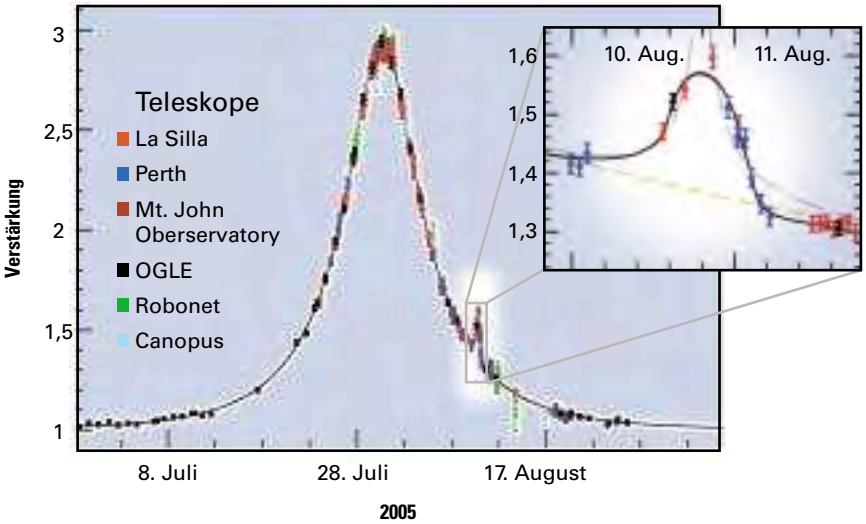
Nachtschicht rund um die Uhr

So schön die Methode auf den ersten Blick klingt, hat sie freilich einen Nachteil: Aufhellungen durch Gravitationslinsen sind extrem selten und treten jeweils höchstens bei einem unter einer Million Sternen auf. Deshalb teilen sich die Astronomen die Arbeit. Eine Gruppe, das »OGLE-Team« (nach *Optical Gravitational Lensing Experiment*), misst regelmäßig mehrmals pro Woche die Helligkeit von 10 Millionen Sternen. Wenn einer davon in einer Weise aufleuchtet, die für den Gravitationslinseneffekt charakteristisch ist, geht ein »E-Mail-Alarm« an interessierte Wissenschaftler. Im letzten Jahr wurde so in 600 Fällen ein Microlensing-Ereignis bereits in der Frühphase erkannt. Das PLANET-Team ermittelt dann durch sehr häufige Messungen, idealerweise einige Male pro Stunde, den genauen Verlauf der Lichtkurve, um mögliche Abweichungen erkennen zu können.

Dazu dienen vier Teleskope auf der Südhalbkugel. Ihre Standorte in Tasmanien, Westaustralien, Südafrika und Chile sind so gewählt, dass zu jedem Zeitpunkt mindestens an einem Dunkelheit herrscht. Dadurch kann die Helligkeit des fraglichen Sterns in einer Art 24-Stunden-Nachtschicht rund um die Uhr verfolgt werden.

Am 10. August 2005 war es wieder einmal so weit: Das Microlensing-Ereignis OGLE-2005-BLG-390 zeigte eine auffällige Abweichung. Zuvor hatte die Lichtkurve wenig spektakulär ausgesehen: Die Helligkeit war auf das Dreifache des Normalwerts gestiegen und gerade dabei, wieder abzusinken. Plötz- ▷

Lichtkurve von OGLE-2005-BLG-390



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: ESO

Die Lichtkurve des Microlensing-Ereignisses OGLE-2005-BLG-390 zeigt ein zweites Maximum, das durch einen Planeten erzeugt wurde. Dieser hat, wie eine genaue Analyse der Beobachtungsdaten ergab, vermutlich die 5,5-fache Masse und den 2,6-fachen Bahnradius der Erde.

▷ lich aber nahm sie noch einmal zu und erreichte ein zweites Maximum, bevor die Kurve endgültig abflachte. Dieses neuerliche Aufleuchten dauerte nur 15 Stunden und verlief genau so, wie die Astronomen es von einem Planeten als Begleiter erwarteten.

Fünf verschiedene Observatorien bestätigten die Messpunkte, die deutlich von der Lichtkurve für eine Einzellinse abwichen. Beim Analysieren und Modellieren der Daten ließ sich nur eine Erklärung finden: ein Trabant, der den Linsenstern umkreist und 80 Millionstel von dessen Masse aufweist.

Dabei hatten die Astronomen die ferne Sonne selbst ebenso wenig zu Gesicht bekommen wie ihren Planeten; denn sie leuchtet zu schwach, um direkt sichtbar zu sein. Durch den Gravitationslinseneffekt aber verrät sie sowohl ihre eigene Existenz als auch die des planetaren Begleiters. Freilich kann man dabei nur das Verhältnis der beiden Massen bestimmen und nicht diese selbst. Aus der Verteilung der Sternmassen in der Milchstraße lässt sich allerdings auf statistischem Weg die Größe des Linsensterns abschätzen. Danach hat er vermutlich 0,1 bis 0,4 Sonnenmassen, mit 0,2 als wahrscheinlichstem Wert. Für den Planeten ergäbe sich daraus die 5,5-fache Masse der Erde.

Das neu entdeckte Sonnensystem liegt etwa 22 000 Lichtjahre von uns entfernt. Damit ist eine weiter gehende Untersuchung des Planeten leider so gut wie ausgeschlossen. Eventuell kann man den Linsenstern in einigen Jahren, wenn er genügend weit vom viel heller leuchtenden Hintergrundobjekt weggewandert ist, mit einem hochauflösenden optischen oder Infrarot-Teleskop direkt beobachten. Dann ließe sich seine Masse relativ genau bestimmen und damit auch die des Trabanten endgültig festlegen.

OGLE-2005-BLG-390-Lb ist schon der dritte mit der Microlensing-Methode gefundene Planet. Die Massen der ersten beiden, die 2004 und 2005 veröffentlicht wurden, lagen etwas oberhalb derjenigen von Jupiter. Wie bei den anderen Verfahren lassen sich auch bei der Suche mittels Gravitationslinsen große Planeten leichter aufspüren. Angesichts dessen erscheint es durchaus bemerkenswert, dass unter den ersten drei schon ein ziemlich kleiner Vertreter gefunden wurde. Offenbar sind solche erdähnlichen Objekte in der Milchstraße viel weiter verbreitet, als die bisherige Liste der entdeckten Exoplaneten nahe legt. In der Tat sollten sie nach allem, was wir über die Entstehung von Planeten wissen, wesentlich häufiger vorkommen als die »heißen Jupiter«.

Joachim Wambsganß ist Professor am Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg und Mitglied des PLANET-Teams.

HIRNFORSCHUNG

Cello oder Flöte?

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Über unsere Vorlieben für bestimmte Musikinstrumente entscheidet die individuelle Architektur unseres Hörkortex.

Von Stefanie Reinberger

Haben Sie den Eindruck, dass die Töne eher nach oben oder eher nach unten gehen?«, fragt Peter Schneider, der auch Journalisten, die in seinem Labor am Heidelberger Universitätsklinikum vorbeischauen, gerne mal einem Hörtest unterzieht. Der promovierte Physiker hat zusätzlich ein Studium der Kirchenmusik abgeschlossen. Nun verbindet er im Rahmen seiner Forschungsarbeit seine beiden – nur scheinbar gegensätzlichen – Interessengebiete: Er ist der individuellen Tonwahrnehmung auf der Spur.

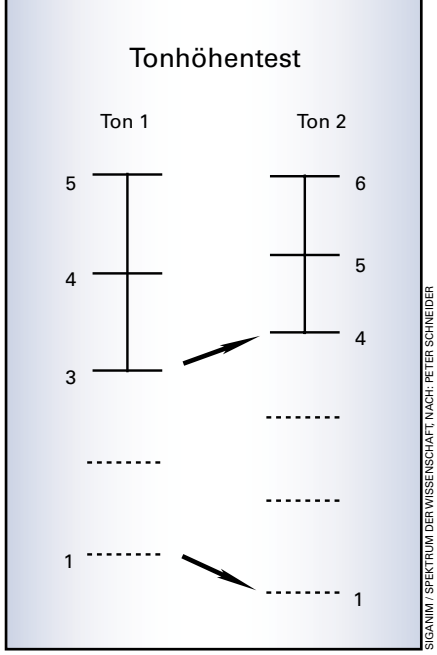
Dass der eine helle Flötentöne bevorzugt, während der andere sich eher zum satten, tiefen Klang eines Cellos hingezogen fühlt, ist nämlich kein Zufall. Vielmehr teilt sich die Menschheit in zwei Hörtypen auf: Grundtonhörer, die vor allem jene Schwingungen wahrnehmen, die an der Basis eines Akkords liegen, und Obertonhörer, denen eher die darüberliegenden, mitschwingenden Frequenzen im Ohr klingen. Und zu welcher Gruppe wir gehören, so hat Schneider gemeinsam mit seiner Kollegin Vanessa Sluming von der Universität Liverpool (Großbritannien) festgestellt, darüber entscheidet die Architektur unserer Hörrinde *(Nature Neuroscience, Bd. 8, S. 1241, und Annals of New York Academy of Science, Bd. 1060, S. 387)*.

Grundlage für diese Entdeckung bildete der eingangs erwähnte Test. Über Kopfhörer werden der Versuchsperson dabei computergenerierte Töne eingespielt – allerdings nur die Oberschwingungen ohne den zugehörigen Grundton. »Es ist im Prinzip wie ein Akkord,

dem aber der tiefste Ton als Basis fehlt«, erklärt Schneider. Die Klänge treten immer paarweise auf und die Probanden müssen entscheiden, ob die Lage vom ersten zum zweiten Signal höher oder tiefer wird. Der Clou an der Sache: Die eingespielten Oberschwingungen bewegen sich jeweils in eine andere Richtung, als es der Grundton – und damit der gesamte Akkord – tun würde. Während nun also ein Obertonhörer beispielsweise feststellt, dass die Tonhöhe vom ersten zum zweiten Klang steigt, orientiert sich eine Grundtonhörerin am eigentlich gar nicht vorhandenen Basiston, ergänzt diesen in Gedanken und behauptet das Gegenteil.

Insgesamt 420 Probanden – darunter Musikstudenten, Orchestermusiker, Amateure und Menschen, die selbst nicht musizieren – haben Schneider und seine Kollegen inzwischen untersucht. Dabei stellten sie fest, dass die Ober- und Grundtonhörer in der Bevölkerung recht gleichmäßig verteilt sind. Jedem Hörtyp ließ sich ungefähr die Hälfte der Testpersonen zuordnen, unabhängig von Alter, Geschlecht oder musikalischer Vorbildung.

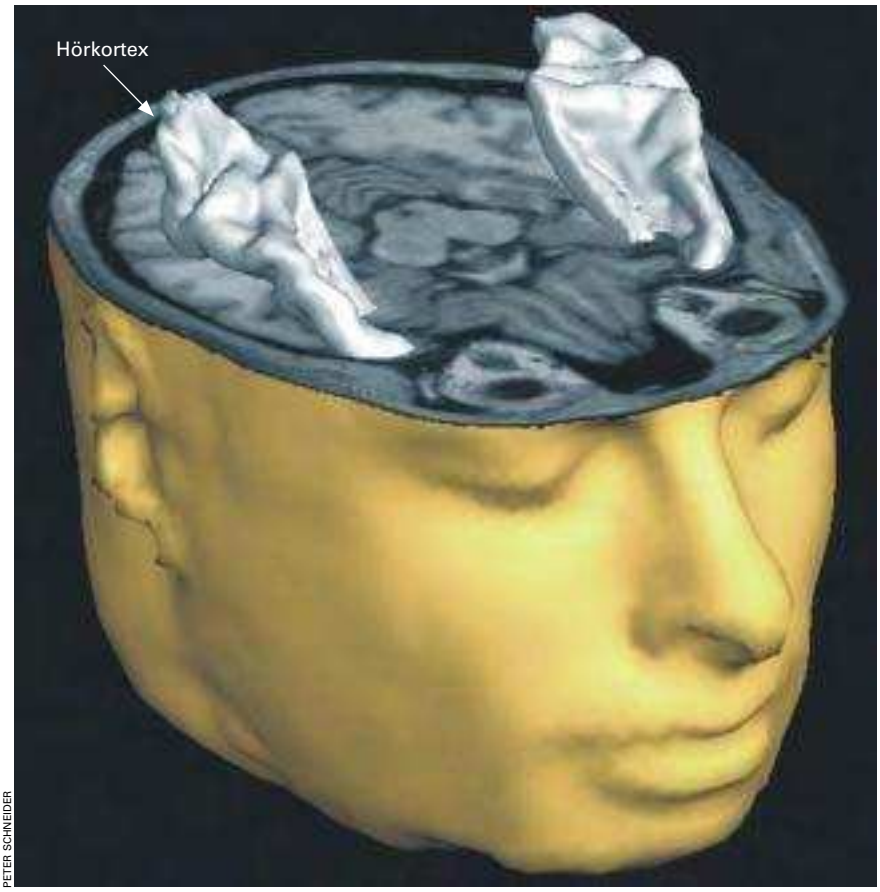
»Damit war uns klar, dass die Veranlagung für das Hörempfinden im Ge- ▷



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: PETER SCHNEIDER

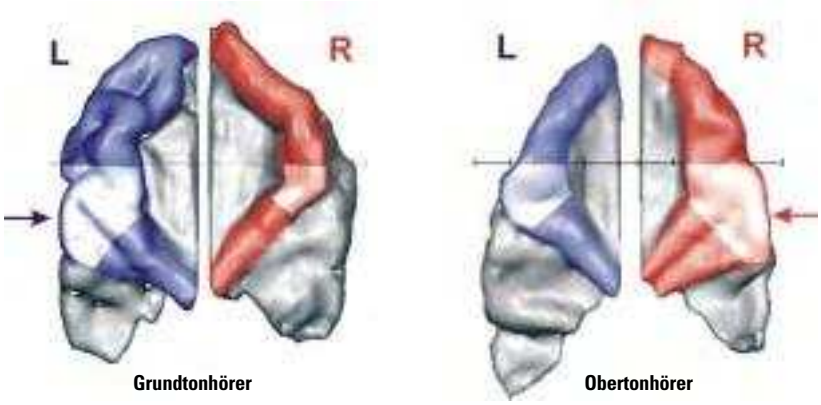
Zur Unterscheidung zwischen Ober- und Grundtonhörern spielten die Forscher Probanden hintereinander zwei »Akkorde« vor, bei denen der ausgeblendete Grundton sank, während der tiefste hörbare Oberton stieg. Folglich klang für Grundtonhörer der zweite Akkord tiefer, für Obertonhörer dagegen höher.

Der Hörkortex – die für das Hören zuständige Hirnregion – verteilt sich symmetrisch auf beide Hirnhälften.



PETER SCHNEIDER

PETER SCHNEIDER



Für Grundtonhörer enthält der linke Hörkortex in der Heschl-Windung mehr graue Substanz (blau) als der rechte (rot). Bei Obertonhörern ist es gerade umgekehrt. Ebenso unterscheidet sich der Bereich, der beim Hörtest aktiviert wird (aufgehellt).

▷ hirn festgelegt sein muss«, erläutert Schneider und ergänzt: »Wo genau, fanden wir mit Hilfe von bildgebenden Verfahren heraus.« Insgesamt 87 der zuvor getesteten Personen – darunter 34 Grund- und 53 Obertonhörer – standen für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Zunächst spähten ihnen die Wissenschaftler per Magnetresonanztomografie (MRT) ins Oberstübchen. Anhand der so erhaltenen Informationen erstellten sie dreidimensionale Modelle der Probandengehirne und ermittelten das Volumen einzelner Regionen.

Dabei interessierten sie sich besonders für die Hörrinde, genauer gesagt die Heschl'sche Windung, welche die ungefähre Lage des primären Hörzentrums markiert. Als Schneider und seine Kollegen die graue Masse in diesem Hirnareal maßen, entdeckten sie einen klaren Unterschied zwischen den beiden Gruppen von Probanden: Während die charakteristische Windung in ihrem seitlichen (fachlich: lateralen) Bereich bei Grundtonhörern in der linken Hirnhälfte oft fast doppelt so viel graue Substanz aufwies wie in der rechten, verhielt es sich bei Obertonhörern umgekehrt.

Die verschiedenen Hörempfindungen scheinen sich demnach – zumindest anatomisch betrachtet – im Gehirn niederzuschlagen. Doch stecken hinter der Asymmetrie auch funktionelle Unterschiede? »Ja«, sagt Schneider, »das konnten wir mit Hilfe der Magnetenzephalografie nachweisen.« Dazu zeichneten die Wissenschaftler während der Versuche die Magnetfeldänderungen außerhalb des Kopfes auf und maßen so indirekt die Hirnströme der Probanden beim Hören von Klängen. Daraus ließ sich mit einer speziell entwickelten Methode die Aktivierung im Hörkortex berechnen.

Dabei stellte sich heraus, dass die linke Hirnhälfte auf Grundtöne spezialisiert ist, während die rechte stärker auf Obertöne reagiert. Wie sich außerdem zeigte, werden links eher kurze, in der gegenüberliegenden Hemisphäre dagegen lang ausgehaltene Klänge verarbeitet. »Das bedeutet, dass Grundtonhörer besser schnelle, virtuose Rhythmen verarbeiten können, während sich Obertonhörer mit länger ausgehaltenen Tönen leichter tun«, erklärt der Experte für bildgebende Verfahren.

Im Übrigen sind Schneiders Ergebnisse keineswegs nur graue Theorie. Als er und seine Kollegen ihre Resultate mit den musikalischen Vorlieben der Versuchspersonen verglichen, stellte sich heraus, dass zumindest Profis ihre Instrumente gemäß ihrem Hörtyp gewählt hatten: Grundtonhörer fühlten sich zu hohen Melodieinstrumenten wie Flöte, Violine und Klavier, aber auch Schlagzeug hingezogen; Obertonhörer hingegen neigten eher zu den tieferen Klangkörpern wie Cello, Fagott oder Tuba. Sänger gehören ebenfalls der Obertonfraktion an. »Interessanterweise stellte sich heraus, dass auch moderne Sinfonieorchester der von der Natur vorgegebenen Asymmetrie entsprechen«, ergänzt Schneider: »Während die Grundtonhörer links vom Dirigenten sitzen, ist die Gruppe mit den tieferen Instrumenten rechts zu finden.«

Die Daten sprechen für sich. Sollte aber nun jedes Kind einem Hörtest unterzogen werden, bevor man es zum Musikunterricht anmeldet? »Das könnte helfen«, meint Schneider. Wer seinen Höranlagen entsprechend ein Instrument aussucht, wird es wahrscheinlich leichter erlernen. Seine Töchter, so erzählt der Wissenschaftler, hätten – wie wohl die meisten Menschen – von selbst ihrem Hörtyp entsprechend gewählt. Doch auch wer sich entgegen seiner biologischen Veranlagung für ein Instrument entscheidet, muss deswegen kein schlechter Musiker werden. »Zum Beispiel sind viele Jazzpianisten eigentlich Obertonhörer«, erklärt Schneider. »Sie spielen aber auch ganz anders als ihre grundtonhörenden Klassikkollegen.«

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg. Obwohl Obertonhörerin, spielt sie Querflöte.

GLOSSE

Alchemist in Norwegen

***ES WAR EINMAL** ein Weiser aus dem Abendland. Im hohen Norden forschte er zum Wohle der Menschheit und bekämpfte unermüdlich einen ihrer hinterlistigsten Widersacher. Viele seiner Unternehmungen waren von Erfolg gekrönt, seine zahlreichen Adepten blickten ehrfürchtig zu ihm auf und andere Weise zollten ihm Respekt.*

Jon Sudbø, 44-jähriger Krebsforscher am renommierten »Radiumhospitalet« in Oslo, galt als Koryphäe in seinem Fach.

Dem Weisen war dies indes nicht genug. Höher und höher strebte er auf der Ruhmesleiter. Seinen Namen sollte man in einem Atemzug mit den größten Meistern der Zunft nennen. Dazu bedurfte es immer weiterer Berichte über neue Heldentaten auf den Feldern der Wissenschaft.

Auch in der Medizin hängt die Reputation in hohem Maß von der Zahl der Veröffentlichungen in einschlägigen Fachzeitschriften ab. Viele Publikationen steigern die Wahrscheinlichkeit, zitiert zu werden, was als Gradmesser erfolgreicher Forschung gilt. Seit 1997 veröffentlichte Sudbø 38 Originalartikel.

Doch so sehr sich der Weise auch mühte, die Liste seiner Papyri wollte nicht rasch genug anwachsen. Da wurde er des beschwerlichen Tuns leid. Und im Stillen fragte er sich: Wozu all die Plage, all die kostbare Zeit, all die Rückschläge und Enttäuschungen? Wer würde ein leichtes Verbiegen der Wahrheit bemerken, wer es wagen, seine Autorität in Frage zu stellen? Also beschloss er, sich das beschwerliche Los des Forschens ein wenig zu erleichtern. Wie mühselig war es doch, sich mit echten Patienten abzugeben, und wie viel einfacher, sie durch solche aus seiner Fantasie zu ersetzen.

Basis von Sudbøs letzter Studie bildete Datenmaterial von 908 Personen. Diese stammten angeblich aus der norwegischen Datenbank Conor, erhoben von 1975 bis 1995. Doch in Wahrheit waren sie frei erfunden.

Das Glück war dem wackeren Recken hold. Eine Schar von 13 Edlen machte sich anheischig, ihre guten Namen zu geben, damit auch sie den Kopf des Papyrus zierten. Und so fand das Werk Aufnahme in eine der ehrwürdigsten Schriften der Zunft.

Die fingierte Studie »bewies«, dass die Einnahme bestimmter, schmerzstillender Medikamente das Risiko von Mundhöhlenkrebs senke. Gutachter attestierten ihr hohe wissenschaftliche Bedeutung und fanden nichts zu beanstanden. So wurde der Artikel von Sudbø und 13 Koautoren Mitte Oktober vergangenen Jahres in der hochangesehenen Fachzeitschrift »Lancet« publiziert.

Doch das Blatt wendete sich. Ein unerschrockener Mitstreiter ließ sich vom äußeren Schein nicht blenden und wagte es, die Saat des Zweifels zu säen. Und siehe da, das Lügengebäude stürzte wie ein Kartenhaus in sich zusammen. Allzu sorglos war der Fälscher zu Werke gegangen. Sein Trug war leicht zu durchschauen.

Erst nach der Veröffentlichung kamen einem unabhängigen Kollegen Zweifel an der Echtheit der Studie. Schon eine oberflächliche Prüfung offenbarte daraufhin haarsträubende Ungereimtheiten. So existiert die Datenbank, der angeblich seit 1975 Fälle entnommen wurden, erst seit 1994. Außerdem hatten 250 Patienten dasselbe Geburtsdatum.

***SCHANDE KAM** über das Haupt des Weisen und er stürzte jäh vom Sockel des Ruhms. Die Schar seiner edelmütigen Namensbürgen wandte sich ab und zieh ihn, sie hintergangen zu haben. Sein Werk wurde aus der erhabenen Schrift getilgt. Schamvoll verkroch sich der Sünder in einer Höhle und schickte einen Rechtsgelehrten vor, seinen Frevel zu bekennen.*

»Lancet« entschuldigte sich und wies alle Verantwortung von sich. Es sei aber unverständlich, wieso keiner der Koautoren den Schwindel bemerkt habe. Sudbø meldete sich krank und ließ durch seinen Anwalt den Betrug einräumen. Bei der Prüfung früherer Veröffentlichungen zeigten sich weitere Unregelmäßigkeiten. Nun sollen auch diese kritisch durchleuchtet werden. In zwei Fällen hat der Autor inzwischen Fälschungen eingestanden.

Der Weise ward seitdem nicht mehr gesehen. Er sitzt in seiner Höhle und sinniert über das Los der Alchemisten. Hatte er nicht wie diese immer brav geliefert, was alle begehrten? Forscherträume zu Gold gesponnen, auch wenn es unecht war? Und wenn er nicht gestorben ist, so grübelt er noch heute, geplagt von einem Schalk, der ihn stets fragt: Und, wie alt waren die Patienten?

Stefan Keilmann

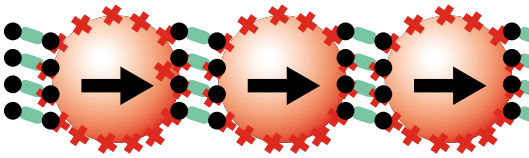
Der Autor hat Germanistik und Philosophie studiert und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Ludwigshafen.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

HYDRODYNAMIK

Blutkörperchen mit Turboantrieb

Mit Magnetkügelchen und DNA-Strängen brachten Forscher Blutzellen das aktive Schwimmen bei.



J. BIBETTE ET AL., NATURE, BD. 437, S. 862

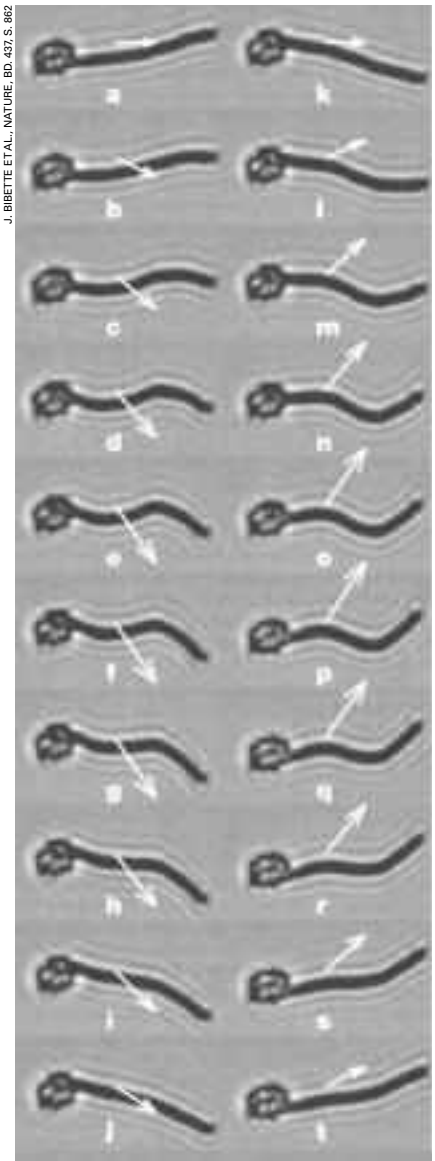
Von Stefan Maier

Der Motor ist schlicht, aber Jahrmilliarden alt. Und er hat sich bis heute glänzend bewährt. Kein Wunder, dass sich Forscher von der französischen Forschungsgesellschaft CNRS und der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) nun ein Beispiel daran nehmen. Gemeint ist die Geißel, mit der sich bestimmte einzellige Urtierchen schlagend fortbewegen. Jérôme Bibette und Kollegen schufen eine Nachbildung davon und testeten sie an einem roten Blutkörperchen. Primär ging es ihnen darum, mit Hilfe des Imitats das Vorbild besser zu verstehen. Auf längere Sicht haben sie allerdings auch nanotechnologische Anwendungen im Auge.

Ihr Versuch verlief jedenfalls auf spektakuläre Weise erfolgreich: Mit dem künstlichen Motor konnte das rote Blutkörperchen gezielt in jede gewünschte Richtung schwimmen und brachte es dabei auf Geschwindigkeiten bis zu sieben Mikrometer pro Sekunde *(Nature, Bd. 437, S. 862)*. Bezogen auf den Menschen entspricht das immerhin einem strammen Schritttempo.

Mikroskopisch kleine Einzeller lösen mit der Geißel, fachsprachlich Flagellum, ein Problem, das sich für uns Menschen gar nicht stellt. Wenn Franziska van Almsick seinerzeit im Rekordtempo durchs Wasser glitt, musste sie praktisch nur den Strömungswiderstand überwinden. Objekte mit Durchmessern von wenigen Mikrometern haben dagegen vor allem mit der Zähigkeit (Viskosität) der sie umgebenden Flüssigkeit zu kämpfen.

Das erfordert eine völlig andere Schwimmtechnik. Wenn man einen Film betrachtet, in dem ein Fisch einmal mit der Schwanzflosse hin- und herschlägt, kann man die zweite Hälfte des Schlags simulieren, indem man die erste rückwärts laufen lässt. Bewegungen, die auf diese Art zeitumkehrbar sind, erzeugen in einem hochviskosen Medium keinen Vortrieb. Deshalb wären Flossen für einen Mikroorganismus nutzlos. Mit dem Flagellum lassen sich dagegen nichtzeitumkehrbare zyklische Bewegungen realisieren. So benutzen Bakterien den haarartigen Fortsatz als korkenzieherförmigen Propeller, während einzellige Urtierchen durch Peitschenschläge Wellen zur Geißelspitze hinlaufen lassen, die den gewünschten Schub generieren.



J. BIBETTE ET AL., NATURE, BD. 437, S. 862

Ein variables Magnetfeld (Pfeile) ließ die künstliche Geißel schlagen, sodass sie ein angeheftetes rotes Blutkörperchen in Bewegung setzte. Der Zeitabstand zwischen den Aufnahmen beträgt fünf Millisekunden.

Bibette und seine Kollegen haben dieses Konzept nun adaptiert und mit viel Fantasie technisch umgesetzt. Der schwierigste Punkt war, einen einfachen Mechanismus zu finden, um das künstliche Flagellum in eine wellenartige Bewegung zu versetzen. Die Lösung der Forscher ist elegant. Ihre Geißel besteht aus etwa dreißig kleinen magnetischen Kügelchen mit Durchmessern von einem Mikrometer, die durch kurze DNA-Stücke miteinander verbunden sind und sich über äußere Magnetfelder nach Belieben dirigieren lassen.

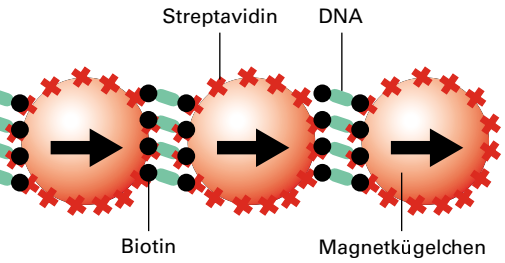
Motor für Winzlinge

Bei der Herstellung griff das Team auf Standardmethoden der Mikrobiologie zurück. Es versah etwa 0,1 Mikrometer kurze DNA-Stränge an den Enden mit Biotin und mischte sie mit Magnetkügelchen, die es zuvor mit Streptavidin überzogen hatte. Da die beiden Proteinmoleküle eine starke Bindung miteinander eingehen, wirkten sie wie ein Kleber: Sie verknüpften die biegsamen DNA-Stränge mit den Magnetkügelchen zu gelenkigen Ketten.

Diese künstliche Geißel befestigten die Forscher nun an einem roten Blutkörperchen. Um das Rennen zu starten, legten sie zunächst ein konstantes Magnetfeld an. Damit zogen sie die Kette stramm und gaben die Bewegungsrichtung vor. Dann schalteten sie ein zweites Magnetfeld senkrecht zum ersten ein. Es war allerdings nicht konstant; Intensität und Richtung oszillierten vielmehr wie bei einer Sinuskurve.

Da die Magnetkügelchen stets zum Bereich größter Feldstärke hinstreben, begann sich die Kette schlangenartig zu verwinden. Und siehe da: Das Blutkörperchen setzte sich in Bewegung. Durch Veränderung der Amplitude und Frequenz des magnetischen Wechselfelds ließ sich die Geschwindigkeit variieren.

Mit diesem künstlichen Motor konnte das Forscherteam nun die gängige Theorie der Flagellum-Bewegung testen. Es handelt sich um eine komplizierte



Mit Metallkügelchen, die über kurze DNA-Stücke verknüpft waren, schufen Forscher eine flexible, magnetisch steuerbare Geißel.

Kombination aus Elastizitätslehre und Hydrodynamik, die insbesondere voraussagt, dass die durch den Peitschenschlag ausgelöste Bewegung eine von der Schlagfrequenz bestimmte Geschwindigkeit nicht überschreiten kann. Dieses Maximaltempo hängt von mehreren Faktoren ab, hauptsächlich aber von der Länge der Geißel. Je kürzer sie ist, desto leichter lässt sie sich bewegen, aber desto weniger Vortrieb erzeugt sie beim Schlag. Deshalb steigt die erreichbare Maximalgeschwindigkeit zunächst mit der Geißellänge. Irgendwann allerdings dominiert der Einfluss der Viskosität: In dem zähen Medium wird ein zu langes Flagellum schließlich selbst zur hinderlichen Schleppe.

In ihren Experimenten konnten die Forscher diese Zusammenhänge bestätigen. Indem sie kürzere und längere Geißeln an unterschiedlichen Stellen mit verschieden großen Blutkörperchen verknüpften, variierten sie einen dimensionslosen Parameter, von dem der Theorie zufolge die erreichbare Höchstgeschwindigkeit abhängt. Das Maximum der Messkurve lag tatsächlich an der theoretisch vorhergesagten Stelle.

Einen Unterschied gab es aber doch: Die Höchstgeschwindigkeit hing nicht nur von der Schlagfrequenz ab, sondern auch von der Stärke der Schläge, also von der Amplitude der das Flagellum entlanglaufenden Welle. Die aber kommt in den bisherigen Gleichungen nicht vor. Nun dürfen sich also erst einmal die Theoretiker wieder die Köpfe zerbrechen.

Bibette will deren Ergebnisse allerdings nicht abwarten, sondern setzt auf weitere Experimente, um die Performance seiner Mikroschwimmer zu optimieren. Dabei hofft er, dass seine Arbeit irgendwann auch einen praktischen Nutzen haben wird. Wenn dereinst winzige Roboter im Blutkreislauf zirkulieren und etwa Medikamente kontrolliert zu bestimmten Geweben transportieren sollen, brauchen sie schließlich einen Motor, der in ihrem Milieu möglichst effizient funktioniert.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).

KOSMOLOGIE

Gammastrahlen enthüllen Dunkle Materie

Obwohl die Dunkle Materie bisher nicht direkt nachweisbar ist, ließ sich die Verteilung der zugehörigen Teilchen in unserer Galaxis nun sichtbar machen – anhand von Gammastrahlung, die bei der Selbstvernichtung dieser so genannten Wimps entsteht.

Von Georg Wolschin

Das Universum enthält große Mengen Materie, die nicht leuchtet und daher unsichtbar ist. Der Schweizer Astronom Fritz Zwicky hatte sie schon in den 1930er Jahren auf Grund der Galaxienbewegungen im Coma-Haufen erstmals postuliert. Seither gibt es eine Fülle weiterer indirekter Belege dafür.

Nach dem heute weit gehend akzeptierten Weltmodell macht die gewöhnliche Materie, die sich direkt beobachten und messen lässt, nur etwa fünf Prozent der Energiedichte des Kosmos aus. Die Dunkle Materie steuert knapp ein ▷

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

» **Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI**
Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

» **DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor**
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

» **F.u.G. Elektronik GmbH**
Hochgenaue Gleichspannungsversorgungen
Netzgeräte für Nieder- und Hochspannung
für alle Anwendungen in Forschung und Technik
www.fug-elektronik.de

» **Foto-Scout-Zuse**
Die lernende Bildsuchmaschine der
besonderen Art zum Sichten, Sortieren und
Wiederfinden von Fotos auf Ihrem PC
www.foto-scout-zuse.com

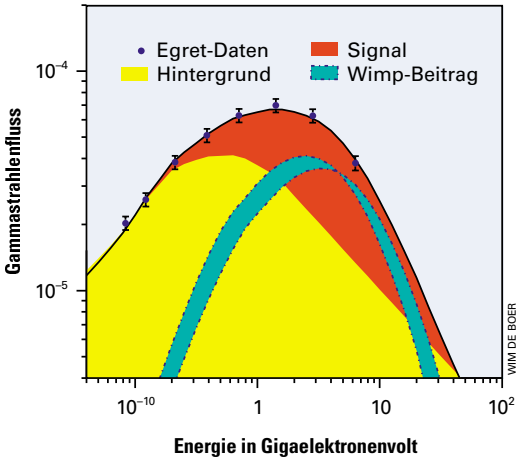
» **Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente**
www.kernmechanik.de

» **Patentanwälte Charrier Rapp & Liebau**
Beratung und Vertretung in Patent-,
Muster- und Markenangelegenheiten,
Lizenzen und Patentrecherchen
www.charrier.de

» **www.weltraum-versand.de**
kontakt@weltraum-versand.de
Alles über Astronomie und Raumfahrt

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de



Die Intensität des vom Egret-Satelliten gemessenen Gammastrahlenflusses (blaue Punkte) übersteigt bei hohen Energien das Hintergrundsignal (gelb). Dieser Überschuss (rot) lässt sich mit einem Beitrag (türkis) erklären, den die Selbstvernichtung von Wimps mit einer Masse zwischen fünfzig und siebzig Elektronenvolt liefert.

▷ Viertel bei. Der fehlende Rest von mehr als siebzig Prozent schließlich besteht aus so genannter Dunkler Energie, die gleichmäßig im Universum verteilt sein muss. Ihre Existenz erscheint allerdings noch nicht zweifelsfrei gesichert.

Auch die physikalische Natur und Zusammensetzung der Dunklen Materie ist bisher unbekannt. Einige ihrer Eigenschaften aber lassen sich erschließen. Da diese Materie sich durch Gravitation in Galaxien konzentriert und mit ihrer Schwerkraft ihrerseits einen Beitrag zum Zusammenhalt solcher Sternsysteme leistet, sollten die Teilchen, aus denen sie besteht, eine von null verschiedene Masse haben. Außerdem können sie höchstens der schwachen Kernkraft unterliegen. Würden sie nämlich über die starke Kernkraft oder elektromagnetisch wechselwirken, hätte man sie längst direkt nachgewiesen.

Für die Natur solcher schwach wechselwirkenden massereichen Partikel – oder Wimps, wie sie nach englisch *weakly interacting massive particles* oft genannt werden – existieren diverse theoretische Vorschläge. Beispielsweise sollte es in einer »supersymmetrischen« Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik ein so genanntes Neutralino geben, aus dem wesentliche Anteile der Dunklen Materie bestehen könnten. Auch eine Erweiterung der Quantenchromodynamik, welche die Kräfte zwischen den Quarks beschreibt, sagt die Existenz eines Teilchens voraus, das als Komponente der Dunklen Materie in Frage käme.

Selbstvernichtung beim Zusammenstoß

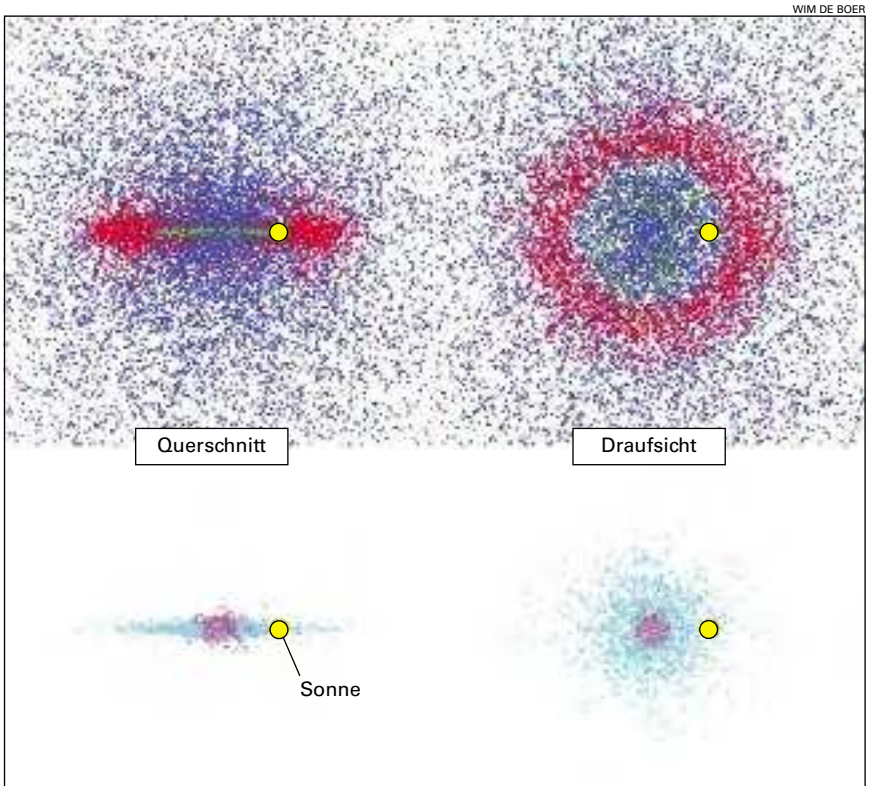
Bisher sind zwar alle Bemühungen gescheitert, solche Partikel mit speziell dafür entwickelten Detektoren direkt nachzuweisen. Nach den Berechnungen der Kosmologen sollten sie im Universum gleichwohl ungefähr so häufig sein wie die Baryonen, aus denen normale, sichtbare Materie besteht. Deren Anzahl hat sich seit den Anfängen des Universums durch gegenseitige Vernichtung von Teilchen und Antiteilchen – Physiker sprechen von Annihilation – um zehn Größenordnungen verringert. Übrig geblieben sind die stabilen Partikel, die unsere Welt aufbauen.

Eine ähnliche Selbstvernichtung gibt es laut Theorie auch bei den Wimps – zumindest bei denen, die aus dem Supersymmetriemodell folgen. Allerdings bestehen einige bedeutende Unterschiede zu den Baryonen. So sind supersymmetrische Wimps mit ihren Antiteilchen identisch.

Das hat eine wichtige Konsequenz: Während bei der Annihilation der Baryonen die im Unterschuss vorhandenen Antiteilchen schon im frühen Kosmos völlig aufgerieben wurden, gab es bei den Wimps keine zwei Sorten, von denen nur eine übrig blieb. Wenn sich also Partikel der Dunklen Materie begegnen, besteht auch heute noch die Möglichkeit, dass sie einander auslöschen. Weil sie weder der starken noch der elektromagnetischen Kraft unterliegen, ist der Wirkungsquerschnitt für ihre Annihilation allerdings ziemlich gering. Mit anderen Worten: Zwei aufeinander treffende Wimps zerstören sich – zumindest heutzutage – nur sehr selten.

Manchmal aber kommt es zur gegenseitigen Vernichtung. Dann entstehen laut Theorie Quarkpaare, aus denen sich hauptsächlich neutrale Pionen bilden. Das sind sehr kurzlebige Teilchen,

WIM DE BOER



Die Verteilung von Dunkler (oben) und normaler baryonischer Materie (unten) in unserer Galaxis – links im Querschnitt und rechts in der Draufsicht gezeigt – unterscheidet sich deutlich. Die Dunkle Materie erreicht auch außerhalb der galaktischen Scheibe eine relativ hohe Dichte (blau). Innerhalb konzentriert sie sich, wie aus den jüngsten Gammastrahlungsmessungen hervorgeht, dagegen vor allem auf zwei Ringe: einen äußeren (rot) und einen inneren (grün). Die baryonische Materie beschränkt sich fast völlig auf die galaktische Scheibe (türkis) und die Verdickung im Zentrum, den so genannten »Bulge« (violett).

die mit einer Halbwertszeit von nur achtzig trillionstel (8×10^{-17}) Sekunden gleich wieder zerfallen. Dabei entstehen in 98,8 Prozent der Fälle zwei Gammaquanten. Diese extrem energiereichen Photonen (Lichtteilchen) werden von galaktischen Magnetfeldern nicht abgelenkt und interagieren auch kaum mit anderen Partikeln. Damit aber lassen sie sich zu ihrer Quelle zurückverfolgen.

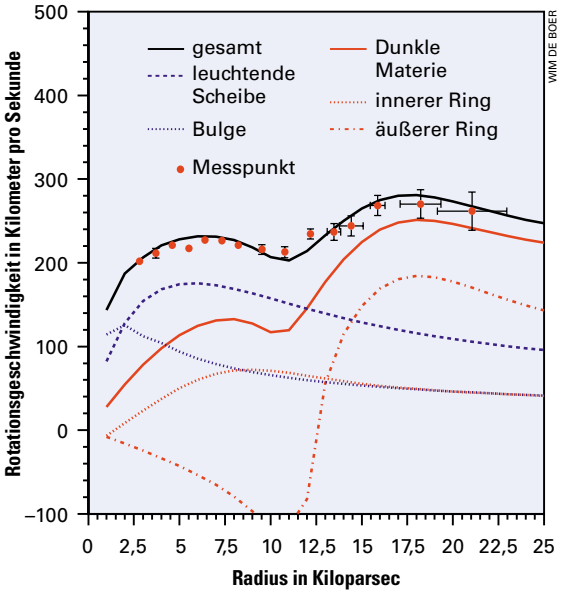
Störende kosmische Strahlung

Dies haben nun Wim de Boer und seine Mitarbeiter an der Universität Karlsruhe ausgenutzt, um nicht nur die Dunkle Materie gleichsam sichtbar zu machen, sondern auch ihre Verteilung in der Milchstraße zu ermitteln *(Astronomy and Astrophysics, Bd. 444, S. 51)*. Dafür griff das Forscherteam auf Daten zurück, die das Teleskop Egret *(Energetic Gamma Ray Emission Telescope)* auf dem Compton-Satelliten der Nasa von 1991 bis 2000 gesammelt hatte.

Leider ist die Annihilation von Wimps nicht die einzige Quelle von neutralen Pionen. Solche Teilchen entstehen auch bei der inelastischen Streuung kosmischer Strahlung – zumeist Protonen – an Gasatomen in der galaktischen Scheibe. Dieser Anteil am Gamma-Spektrum lässt sich aus der bekannten Energieverteilung der kosmischen Strahlung berechnen.

Dabei ergibt sich allerdings ein Defizit. Das hat schon 1997 eine Gruppe um Stanley D. Hunter, inzwischen am Goddard-Raumfahrtzentrum der Nasa in Greenbelt (Maryland), bei der Analyse der Egret-Daten festgestellt: Bei hohen Energien von mehr als einer Milliarde Elektronenvolt ist der aus der kosmischen Strahlung errechnete Gammastrahlenfluss nicht einmal halb so groß wie der tatsächlich beobachtete Wert. Hunter und seine Kollegen konnten sich diese Diskrepanz nicht erklären. Erst jetzt wurde sie von der Gruppe um de Boer mit der Dunklen Materie in Verbindung gebracht.

Als sich die Karlsruher Forscher die Egret-Daten noch einmal genau vornahmen, fanden sie den Überschuss an Gammstrahlung in allen Himmelsrichtungen. Er ist so groß, dass es sich nicht um statistische Schwankungen handeln kann. In jeder Richtung ließen sich die Daten mit einer Wimp-Masse von 60 ▷



Die Rotationskurve der Milchstraße – sie zeigt, wie die Rotationsgeschwindigkeit mit dem Abstand vom Zentrum variiert – setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Weit draußen der Beitrag der Dunklen Materie (rot), im Inneren dagegen der Anteil der leuchtenden Scheibe aus baryonischer Materie (blau gestrichelt).

▷ Milliarden Elektronenvolt ausgezeichnet reproduzieren.

Dabei ergab sich zugleich ein interessantes Bild davon, wie die Dunkle Materie in der Milchstraße verteilt ist. In der galaktischen Ebene konzentrieren sich die unsichtbaren Teilchen demnach auf zwei Ringe mit Abständen von 13000 und 45000 Lichtjahren vom Zentrum. Unser Sonnensystem liegt etwa in der Mitte zwischen ihnen.

Sterne innerhalb des äußeren Rings sollten dessen Gravitationswirkung spüren und deshalb weniger stark vom galaktischen Zentrum angezogen werden. Die schnelleren unter ihnen driften folglich ab und drehen weiter draußen ihre Runden. Dadurch sollte in der galaktischen Rotationskurve, welche die gemessene Rotationsgeschwindigkeit als Funktion des Abstands vom Zentrum der Galaxis angibt, in einem Bereich innerhalb des Rings ein Minimum auftreten. Eine solche Delle existiert tatsächlich. Demnach kann das Ergebnis der Karlsruher Forscher nicht nur den Überschuss energiereicher Gammastrahlen, sondern auch die Form der Rotationskurve unserer Galaxis erklären.

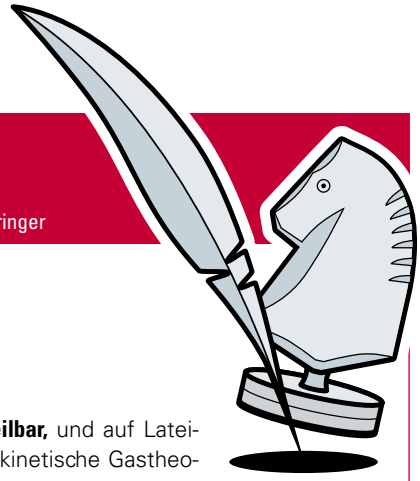
Was den inneren Ring angeht, so fällt er mit einer direkt nachweisbaren Anhäufung von molekularem Wasserstoff zusammen. Da dieser sich in Gegenwart von Staub oder schweren Sternen aus atomarem Wasserstoff bildet, sollte es in der betreffenden Region ein anziehendes Gravitationspotenzial geben, in dem sich genügend Staub ansammeln kann. Ein Ring aus Dunkler Materie könnte gut die Ursache davon sein.

Wie erwähnt, ergibt sich der plausibelste Wimp-Kandidat aus dem Supersymmetriemodell, das für jedes bekannte Teilchen ein deutlich schwereres Gegenstück postuliert. Bisher wurde zwar noch keiner dieser »Superpartner« gefunden. Mit dem Large Hadron Collider am Cern in Genf, der 2007 in Betrieb geht, wollen die Physiker sie jedoch künstlich erzeugen und nachweisen. Es bleibt zu hoffen, dass dabei auch das vergleichsweise leichte Neutralino ins Netz geht. Doch schon jetzt haben es die Karlsruher Forscher mit der Analyse der Egret-Daten anscheinend geschafft, zumindest einen Zipfel der Dunklen Materie zu erhaschen.

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg theoretische Physik und ist Wissenschaftsjournalist.

Springers
EINWÜRFE

von Michael Springer



Gleicht die Gesellschaft einem idealen Gas?

Atom kommt vom griechischen Wort für unteilbar, und auf Lateinisch bedeutet Individuum dasselbe. Die kinetische Gastheorie erklärt Druck und Temperatur durch die Statistik der Atombewegungen, und die Soziologie erforscht das statistische Verhalten menschlicher Individuen, um gesellschaftliche Phänomene zu verstehen. Tatsächlich sind beide Disziplinen ungefähr zur selben Zeit entstanden. Bei Gasatomen pendelt sich durch unzählige Zusammenstöße eine typische Geschwindigkeitsverteilung ein, und analog erwarten Soziologen, dass aus vielen individuellen Aktionen und Reaktionen ein Gleichgewichtszustand mit kleinen Fluktuationen hervorgeht.

Ein geradezu ideales »soziales Gas« schufen jetzt drei Soziologen von der Columbia University in New York und vom Santa Fe Institute in New Mexico *(Science, Bd. 311, S. 854)*. Gut 14000 Testteilnehmer tummelten sich auf einem künstlichen Markt für Popmusik: Sie hörten sich im Internet neue Popsongs an und konnten diejenigen, die ihnen gefielen, kostenlos aus dem Netz herunterladen. Daraus ergab sich eine Hitliste auf dem simulierten Musikmarkt.

Doch zum »sozialen Gas« wurden die Testpersonen erst, als die Forscher Wechselwirkungen zuließen: Jeder Teilnehmer konnte sich informieren, wie oft jeder Song bereits von anderen heruntergeladen worden war. Das Individuum erfuhr gleichsam einen Anstoß, der es über den Zustand des Ensembles informierte – etwa so ähnlich, wie das einzelne Gasatom durch die Heftigkeit der erlittenen Stöße über die Temperatur des Gases »informiert« wird.

Dabei zeigte sich freilich, wie wenig Individuen und Atome einander gleichen. Die Wechselwirkung mit anderen Kaufentscheidungen beeinflusste die individuelle Wahl so, dass selten gekaufte Lieder erst recht gemieden wurden und erfolgreiche noch mehr Anklang fanden. Statt zur statistischen Durchmischung führte die soziale Wechselwirkung zu einer Polarisierung: Hits und Flops schieden sich jetzt viel deutlicher als bei einsamer Kaufentscheidung.

Das Resultat mag, da es nur um Popmusik geht, trivial anmuten. Doch der soziale Ansteckungseffekt wurde noch nie in so großem Maßstab experimentell demonstriert, und er tut, wie ich vermute, auch auf ernsteren Gebieten seine Wirkung. Soziale Ansteckung könnte etwa erklären, warum in modernen Fernseh- und Umfrage-Demokratien oft nur wenige große Parteien die Politik bestimmen. Sie werden demnach weniger wegen ihres besonders attraktiven Programms gewählt, sondern eher wegen ihrer guten Umfragewerte und weil man nur ungern seine Stimme absehbaren Wahlverlierern schenkt.

Das Ergebnis widerspricht zudem Wirtschaftsmodellen, die das Marktgeschehen als Summe von Handlungen rationaler Autisten beschreiben. In Wirklichkeit treiben gestresste Börsianer – und ängstliche Kleinanleger – hektischen Informationsaustausch. Auf Grund derselben sozialen Ansteckung, die auf dem künstlichen Musikmarkt extreme Hits und Flops produzierte, kommt es zu Aktienblasen – wie vor Jahren durch die Fata Morgana der »New Economy« – oder neuerdings zu panischen Fluchtversuchen aus Immobilienfonds.

Michael Springer

In methodischer Hinsicht ist die beschriebene Studie ein Novum, weil erst das Internet ermöglicht, die Reaktionen zehntausender Individuen so rasch und gründlich zu analysieren. Das lässt auf eine verbesserte Theorie sozialer Ensembles hoffen. Auch die Thermodynamik blieb bekanntlich nicht bei idealen Gasen stehen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SIEGESZUG EINER SEUCHE

Das rasche Vordringen des gefährlichen Vogelgrippevirus vom Typ H5N1 weckt Ängste und wirft Fragen auf. Lässt sich die Seuche eindämmen? Wie gefährlich ist das Virus für den Menschen? Können wir uns dagegen schützen? Antworten geben die folgenden Seiten.

Der lange Weg der Vogelgrippe **29**
Zugvögel unter Verdacht **32**
Ansteckungsrisiko für Haustiere **35**
Wie schnell gäbe es genügend Pandemie-Impfstoff? **36**
Der gefährliche Typ H5N1 ..... **37**
Wie wirken Grippemedikamente? **38**

Tagesaktuelle Berichte über die Vogelgrippe finden Sie in **spektrumdirekt**, der Internet-Wissenschaftszeitung von Spektrum unter **www.spektrumdirekt.de**. Auch mehrere Beiträge in diesem Brennpunkt beruhen auf Artikeln, die dort erschienen sind.

Alle Online-Artikel zum Thema: **www.wissenschaft-online.de/grippe**

Weblinks zur Vogelgrippe: **www.spektrum.de/vogelgrippe**

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

EPIDEMIOLOGIE

Der lange Weg der Vogelgrippe

Nach den Ergebnissen einer aktuellen Studie war Südostasien schon seit zehn Jahren Brutstätte des Vogelgrippeerregers, der sich momentan rasch ausbreitet. Inzwischen sind viele lokale Stämme entstanden, was die Bekämpfung erschwert.

Von Jürgen Brück

Rasant dringt das Influenzavirus A vom Typ H5N1 derzeit immer weiter vor und greift nun auch unter europäischen Vögeln um sich. Damit steigt die Gefahr, dass es auf den Menschen überspringt und eine Pandemie auslöst, die Millionen Todesopfer fordern könnte. Um dem zu begegnen, müssen alle Anstrengungen unternommen werden, die anrollende Vogelgrippewelle einzudämmen. Dabei sind Informationen über den genauen Ursprung des Virus, seine Gefährlichkeit und die Art seiner Verbreitung von großer Bedeutung. Aufschlüsse darüber gibt nun eine groß angelegte Studie, die Yi Guan von der Universität Shantou im Osten der chinesischen Provinz Guangdong sowie Kollegen aus Xiamen und Hongkong vorgelegt haben *(Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, Online-Vorabveröffentlichung, doi: 10.1073/pnas.0511120103)*.

Ein besonderes Augenmerk galt dabei der Frage, inwieweit Zugvögel das Virus übertragen. Können sie den Erreger überhaupt über große Distanzen verbreiten oder werden infizierte Tiere so geschwächt, dass sie die weiten ▷

EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

In den Provinzen im Südosten Chinas entstanden seit 1996 immer neue Varianten des Influenzavirus H5N1, die sich dann über die Nachbarländer ausbreiteten. Anfangs geschah das allein durch Tiertransporte.

▷ Flugstrecken gar nicht mehr bewältigen können?

Auf der Suche nach der Antwort analysierten Guan und seine Kollegen zunächst 1092 Blutproben von eingefangenen Wanderenten in der Umgebung des Poyang-Sees nahe der Stadt Jiangxi. Bei immerhin 3,1 Prozent davon ließen sich Antikörper gegen H5N1-Viren nachweisen, die aus einem toten Tier isoliert worden waren. Das bewies, dass infizierte Zugvögel die Vogelgrippe sehr wohl überleben können.

Die Forscher fanden auch den wahrscheinlichen Grund dafür. Wie sich zeigte, waren 4,3 Prozent der untersuchten Wanderenten zugleich mit dem harmloseren Influenzavirus vom Typ H5N2 in Kontakt gekommen: Die meisten positiven Proben enthielten Antikörper gegen beide Erregertypen, und zwar zwei- bis viermal so viele gegen die harmlosere Form wie gegen H5N1. Daraus schließen die Wissenschaftler, dass die Wanderenten zunächst vom H5N2-Virus befallen waren. Das könnte ihnen eine gewisse Immunität gegenüber dem gefährlicheren Typ verliehen haben.

Um herauszufinden, wie lange und wie effizient erkrankte Vögel den Erreger verbreiten können, infizierten Guan und seine Kollegen neun Stockenten und sechs chinesische Gänse mit verschiedenen Stämmen von Grippeviren. Am dritten, siebten und elften Tag danach nahmen sie jeweils Proben. Alle Gänse starben noch vor dem siebten Tag. Dagegen überlebten die Enten die Infektion größtenteils und zeigten nicht einmal besonders ausgeprägte Krankheitsbilder. Bis zum siebten Tag schieden sie das Virus aus. Auch das spricht dafür, dass sie während ihrer Wanderung als Überträger fungieren können.

Verzweigter Stammbaum

Welche Bedeutung den Zugvögeln tatsächlich für die Verbreitung und Erhaltung des Virus zukommt, ließ sich über vergleichende genetische Tests ermitteln. Sie gaben auch Aufschluss darüber, woher die Erreger ursprünglich stammen. Um die Verwandtschaftsbeziehungen unter den regionalen H5N1-Formen zu bestimmen, entschlüsselten die Wissenschaftler das Erbgut von 69 unterschiedlichen Viren, die sie seit Januar 2004 in China isolieren konnten, sowie von 59 Viren, die zwischen August 2003 und März 2005 in Indonesien, Malaysia und Vietnam aufgetaucht waren.

Dabei zeigte die Analyse des Hämagglutinins, dass alle Gene für dieses Oberflächenprotein, das den H-Typ bestimmt, von einem schon 1996 in Guangdong gefundenen Virus abstammen. Sie bildeten in der Folgezeit regionale Varianten. Ein Zweig weist zum Beispiel nach Hongkong. Dort ließen sich Ende 2002/Anfang 2003 bei Vögeln Viren nachweisen, die sich nur wenig von denen aus Guangdong unterschieden. Eng mit ihnen verwandt waren wiederum jene Erreger, die zwischen 2003 und 2005 in Vietnam, Thailand und Malaysia auftraten. Phylogenetische Analysen der Neuraminidase, die den N-Typ bestimmt, untermauern diese Ergebnisse.

Aus den Verwandtschaftsbeziehungen des Virus und seinem regionalen Verbreitungsmuster schließen die Wissenschaftler, dass die Erreger in verschiedenen Gebieten Asiens jeweils längere Zeit örtlich begrenzt auftraten und dort lokale Varianten bildeten. Die meisten solchen örtlichen Formen finden sich im Südosten Chinas. Das unterstreicht, dass dort der Ursprung der jetzigen Vogelgrippewelle liegt.

Das genetisch rekonstruierte Ausbreitungsmuster zeigt aber auch, dass die Rolle der Zugvögel bislang überbewertet wurde. Zumindest in den vergangenen Jahren benutzte das H5N1-Virus ganz überwiegend den Landweg – wahrscheinlich durch den Handel mit Haustieren – und wanderte dabei sehr langsam von einer Region zur nächsten. So entwickelte sich eine gut nachvollziehbare Serie örtlicher Stämme.

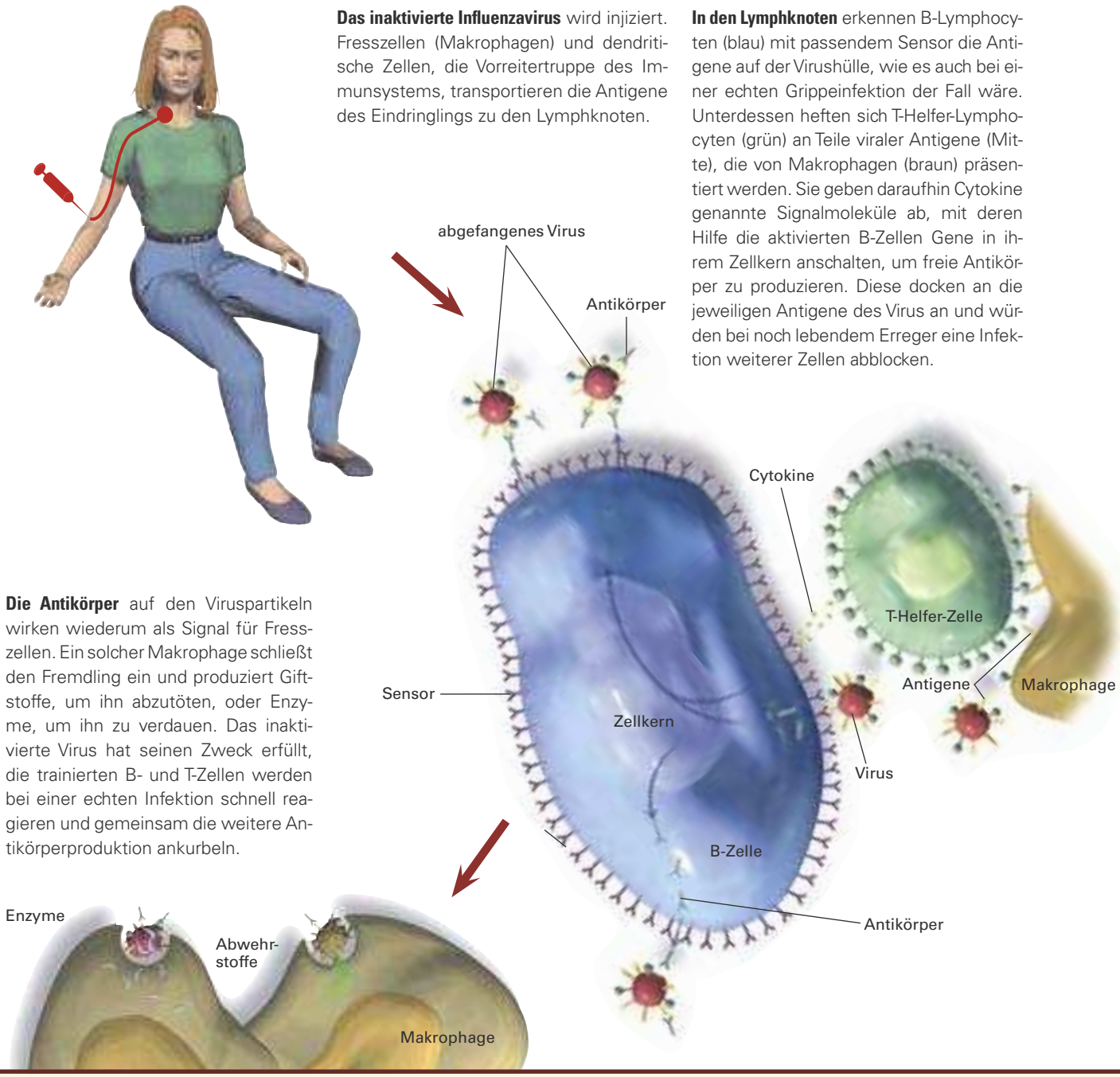
Dennoch trugen auch Zugvögel zur Verbreitung des Erregers bei – offenbar verstärkt in jüngerer Zeit. So unterschied sich ein im Mai letzten Jahres in Vietnam gefundenes Virus stark von der dort seit 2003 grassierenden Variante, war aber fast identisch mit einem Stamm, der im Januar 2005 in der chinesichen Provinz Guanxi isoliert wurde. Dass der Krankheitskeim den weiten Weg so schnell zurücklegte, deutet auf Zugvögel als Überträger hin.

Zudem entdeckten Forscher im Januar und März 2005 am Poyang-See im

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

◀ Im Februar schockten tote Schwäne auf Rügen, die an einer Infektion mit dem Influenzavirus H5N1 verendet waren, die deutsche Öffentlichkeit – und weckten großes mediales Interesse. Tagelang wirkten die lokalen Behörden überfordert, während die Vogelgrippe in immer weiteren Bundesländern auftauchte.

Wie eine Grippeimpfung wirkt



Das inaktivierte Influenzavirus wird injiziert. Fresszellen (Makrophagen) und dendritische Zellen, die Vorreitertruppe des Immunsystems, transportieren die Antigene des Eindringlings zu den Lymphknoten.

In den Lymphknoten erkennen B-Lymphocyten (blau) mit passendem Sensor die Antigene auf der Virushülle, wie es auch bei einer echten Grippeinfektion der Fall wäre. Unterdessen heften sich T-Helfer-Lymphocyten (grün) an Teile viraler Antigene (Mitte), die von Makrophagen (braun) präsentiert werden. Sie geben daraufhin Cytokine genannte Signalmoleküle ab, mit deren Hilfe die aktivierten B-Zellen Gene in ihrem Zellkern anschalten, um freie Antikörper zu produzieren. Diese docken an die jeweiligen Antigene des Virus an und würden bei noch lebendem Erreger eine Infektion weiterer Zellen abblocken.

Die Antikörper auf den Viruspartikeln wirken wiederum als Signal für Fresszellen. Ein solcher Makrophage schließt den Fremdling ein und produziert Giftstoffe, um ihn abzutöten, oder Enzyme, um ihn zu verdauen. Das inaktivierte Virus hat seinen Zweck erfüllt, die trainierten B- und T-Zellen werden bei einer echten Infektion schnell reagieren und gemeinsam die weitere Antikörperproduktion ankurbeln.

BRYAN CHRISTIE

Südosten Chinas bei Wanderenten Viren, die mit denen eines Ausbruchs am 1700 Kilometer entfernten Quinghai-See in Zentralchina übereinstimmten. Diese Variante ist es vermutlich auch, die Ende 2005 in der Türkei festgestellt wurde. Das lässt darauf schließen, dass Zugvögel das Virus auch über weite Distanzen verschleppen können.

Angesichts der vielen Stämme, die der Erreger inzwischen ausgebildet hat, stellt sich auch die Frage nach der Wirksamkeit potenzieller Impfstoffe. Um Klarheit darüber zu gewinnen, führten die Forscher um Guan serologische Analysen durch. Dazu infizierten sie Frettchen mit jeweils einem bestimmten Virusstamm oder einem Impfstoffkandidaten und entnahmen ihnen nach einigen Tagen Blut. Dieses enthielt dann Antikörper gegen das betreffende Virus oder das Testvakzin. Nach Abzentrifugieren der Zellbestandteile brachten die Forscher die klare Restflüssigkeit, also das (Anti-)Serum, mit anderen Influenzaviren zusammen.

Dabei zeigte sich eine hohe Spezifität: Antikörper gegen eine Virusvariante nutzten nur wenig gegen eine andere. So reagierte das Antiserum aus Frettchen, die einen potenziellen Impfstoff erhalten hatten, der auf einem Vogelinfluenzavirus aus einem menschlichen Opfer aus ▷

▷ Vietnam basiert, zwar stark mit Proben aus Vietnam, aber kaum mit den Virenstämmen aus anderen Regionen. Umgekehrt sprach ein Antiserum gegen ein indonesisches H5N1-Virus nur wenig auf Viren an, die aus Vietnam oder den chinesischen Provinzen Jiangxi und Quinghai stammten. Das aber bedeutet, dass im Ernstfall gesonderte Impfstoffe gegen die einzelnen Virusvarianten entwickelt werden müssen.

Aus den Untersuchungen des Teams um Guan, das zwischen Januar 2004 und Juni 2005 Proben von insgesamt 13 000 Zugvögeln und 50 000 Tieren aus Geflügelmärkten analysiert hat, ergeben sich somit mehrere wichtige Folgerungen für eine erfolgreiche Bekämpfung des Virus und zur Verhinderung einer drohenden Pandemie. Zunächst einmal ist es unerlässlich, das Virus an seiner Quelle, also im Südosten Chinas entschlossen zu bekämpfen, damit dort nicht immer neue Mutationen entstehen können, die dann »Kolonien« in den Nachbarländern bilden. Dazu muss die chinesische Regierung allerdings ihre Haltung in dieser Frage grundlegend ändern und darf sich nicht länger mit der Behauptung, in China gebe es lediglich vereinzelte Fälle, vor energischem Handeln drücken.

Wettlauf mit der Zeit

Da Zugvögel nur eine untergeordnete Rolle bei der Verbreitung des H5N1-Virus spielen, sollten sich Ausbrüche der Vogelgrippe lokal mit den gegen Tierseuchen üblichen Maßnahmen – Quarantäne und Töten potenziell infizierter Tiere – stoppen lassen. Je schneller die Tierepidemie so eingedämmt wird, desto geringer ist die Gefahr, dass sich das Virus an den Menschen anpasst.

Was die Impfstoffentwicklung angeht, genügt es nicht, sich auf einen aussichtsreichen Kandidaten für ein Vakzin zu beschränken. Um für eine Pandemie gerüstet zu sein, bedarf es einer breiten Palette möglicher Vorläufer eines Impfstoffs, welche die Vielfalt der existierenden Stämme widerspiegelt und kontinuierlich an auftretende Mutationen angepasst werden muss. Nur so lässt sich der Wettlauf mit der Zeit gewinnen, der inzwischen in ein kritisches Stadium getreten ist.

Jürgen Brück ist freier Journalist in Bonn.

VERBREITUNG

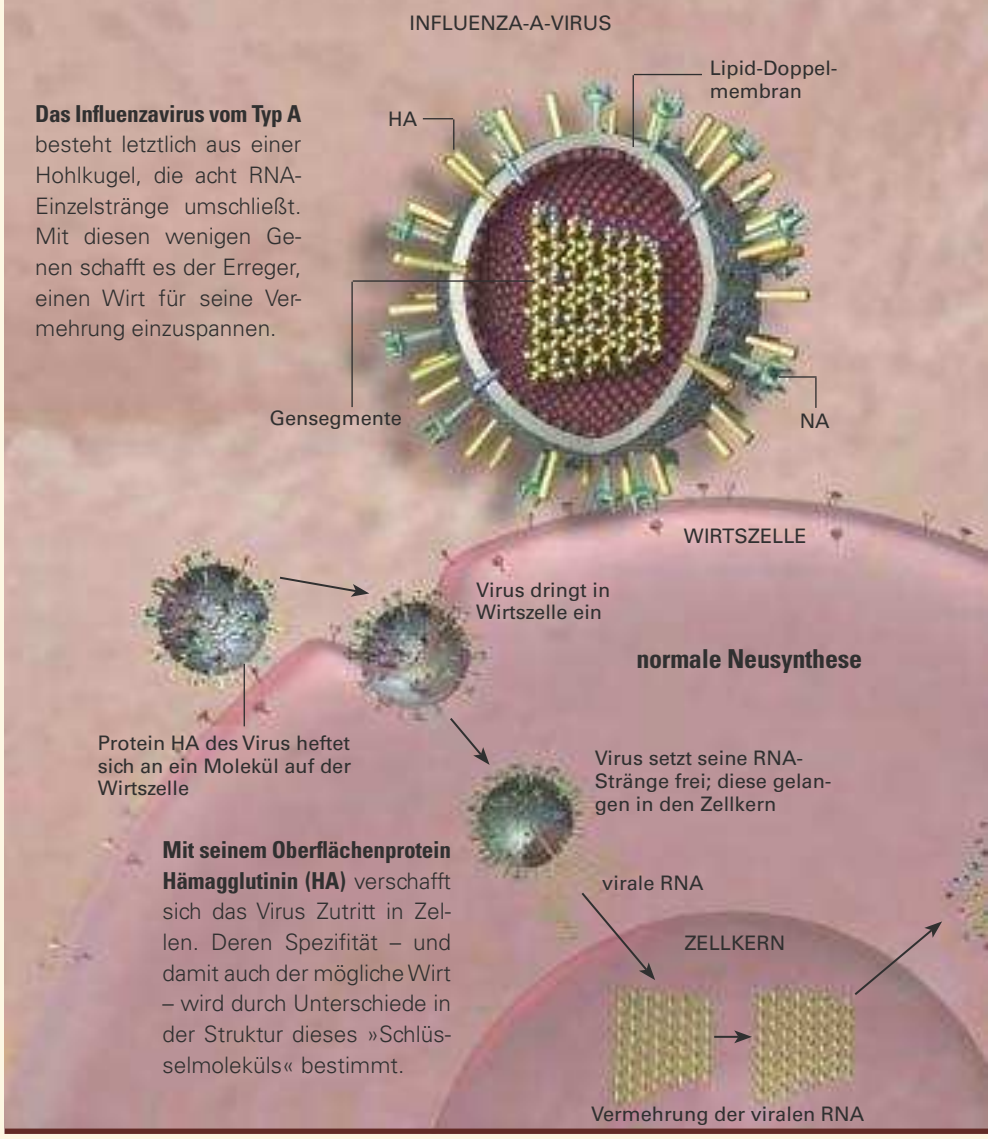
Zugvögel unter Verdacht

Wandernde Vögel gelten normalerweise als Boten von Frühling und Herbst; jetzt aber werden sie misstrauisch als Virenträger beäugt. Können ziehende Enten, Gänse oder Kraniche wirklich die Vogelgrippe verbreiten?

Von Daniel Lingenhöhl

Die Wandlungsfähigkeit des Grippevirus

Der Influenzaerreger ist selbst für ein Virus ziemlich klein. Durch Ablesefehler beim Kopieren der wenigen Gene (unten) entstehen fortlaufend neue Varianten. Zudem können verschiedene Virusstämme sogar Gene austauschen (rechts).



Das Influenzavirus vom Typ A besteht letztlich aus einer Hohlkugel, die acht RNA-Einzelstränge umschließt. Mit diesen wenigen Genen schafft es der Erreger, einen Wirt für seine Vermehrung einzuspannen.

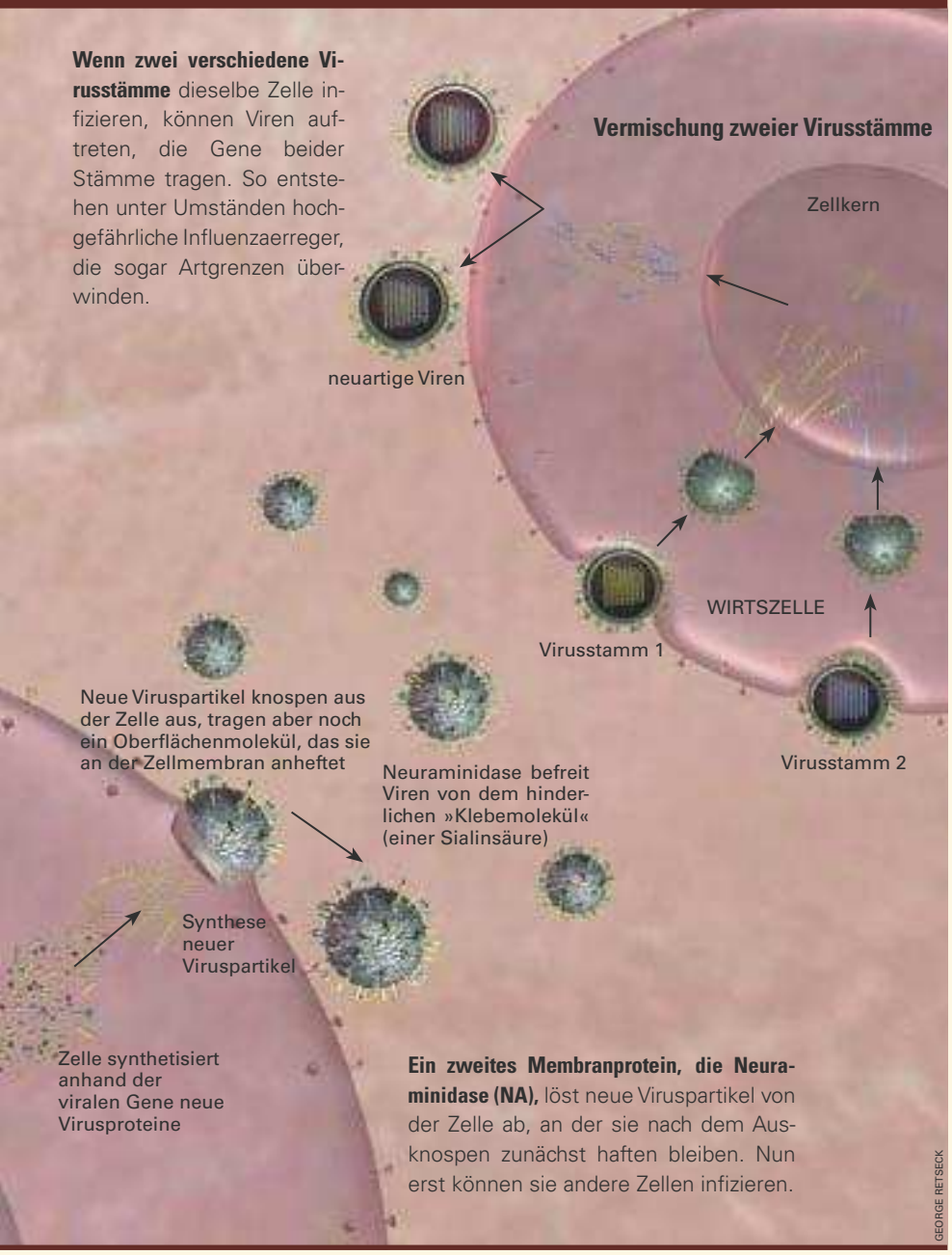
Mit seinem Oberflächenprotein Hämagglutinin (HA) verschafft sich das Virus Zutritt in Zellen. Deren Spezifität – und damit auch der mögliche Wirt – wird durch Unterschiede in der Struktur dieses »Schlüsselmoleküls« bestimmt.

Immer wenn sie einfielen, verhieß das den Menschen nichts Gutes: Die Pestvögel schienen Unheil, Krankheit und Tod zu bringen. Dabei folgten die Seidenschwänze *(Bombycilla garrulus)* nur ihrem natürlichen Drang, winterlichen Notzeiten in Sibirien und Nordskandinavien zu entrinnen. Alle sieben bis zwölf Jahre kommt es zu einer Invasion der ungewöhnlichen Vögel in Mitteleuropa – wahrscheinlich, weil eine übergroße Population der Tiere auf ein Minimalangebot an Früchten und Mispeln in ihrem Herkunftsland trifft.

Den Menschen im Mittelalter war das nicht geheuer – plausible natürliche Erklärungen gab es schließlich noch nicht. Und was sollte man auch von Vögeln halten, die nur alle paar Jahre in großen Schwärmen auftauchten und giftigste Beeren fressen konnten, ohne Schaden zu nehmen: Sie mussten mit dem Teufel im Bunde stehen. Brach dann im folgenden Frühling die Pest oder die Cholera aus, schien klar, dass dies nur mit den Seidenschwänzen zusammenhängen konnte.

Heute fürchten sich die Mitteleuropäer erneut vor ziehenden »Pestvögeln«. Wieder kommen die Unheilsboten aus den Weiten Russlands, nur sollen sie diesmal das gefürchtete Vogelgrippevirus H5N1 im Gepäck haben. Doch welche Rolle spielen wandernde Tiere tatsächlich bei der Ausbreitung von H5N1, das bei Ansteckung auch für Menschen potenziell tödlich ist? Bislang gibt es jedenfalls keine gesicherten Erkenntnisse, dass Zugvögel tatsächlich das Virus übertragen. Anfänglich betraf die Seuche sogar ausschließlich Zuchtgeflügel in Asien, das in großen Mengen auf engstem Raum – oft unter Missachtung hygienischer Standards – gehalten wurde.

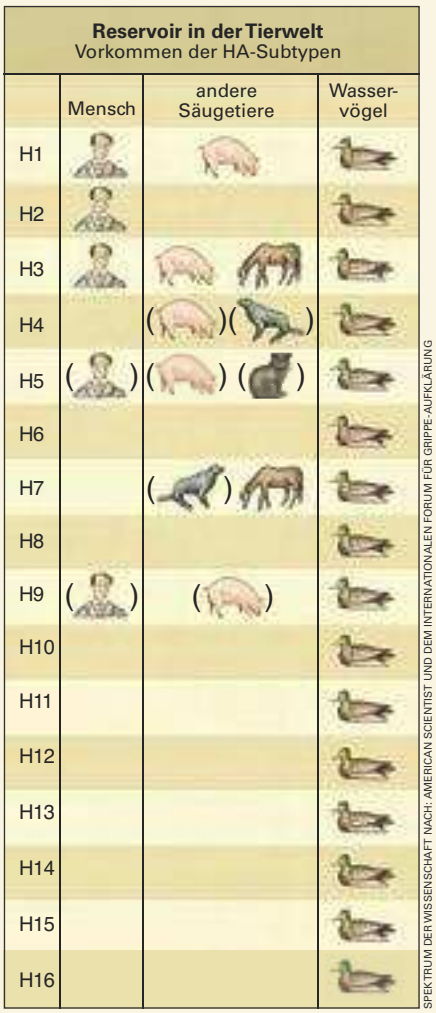
In der Folge breitete sich H5N1 in Ost- und Südostasien offenbar ausschließlich durch – häufig illegale – Tiertransporte aus. Die Viren überleben zudem in feuchtem Erdreich oder in Kot: Erreger, die so an Kleidung oder Reifen anhaften, können dann über das Land verteilt werden. Erst im Juli 2005 kam es wohl zum Übersprung auf Wildtiere am chinesischen Qinghai-See. Binnen Kurzem starben dort tausende Wasservögel an der Krankheit. Seitdem wurde H5N1 immer wieder in toten Wildtieren gefunden.



Verbreitung durch Tiertransporte

Verstärkt gerieten die Zugvögel in Verdacht, Überträger der Seuche zu sein, als die Infektion im weiteren Verlauf des letzten Sommers wie ein Lauffeuer nach Kasachstan, in die Mongolei und nach Sibirien vordrang – Regionen, die auf den Flugrouten zu den sibirischen Brutplätzen liegen. Allerdings flammte die Krankheit zu einer Zeit auf, in der die Tiere bereits brüten und sich mausern und deshalb keine großen Strecken zurücklegen. Nach Recherchen der Vogelschutzorganisation Birdlife International lagen alle neuen Herde außerdem entlang wichtiger Straßen und Eisenbahnlinien: Eine Verbreitung mit Tiertransporten scheint also ebenfalls plausibel.

Für diesen Übertragungsweg spricht, dass Südkorea und Japan nach dem Auftreten einzelner Vogelgrippefälle – ausgelöst durch den Import infizierten Entenfleischs – und der Ausmerzung der Seuche im Jahr 2004 bis heute verschont blieben. Dabei treten im benachbarten China immer neue Ausbrüche auf, und die beiden Staaten werden von einer Vielzahl an Zugvögeln angesteuert. Vogelgrippefrei sind auch noch Australien und Neuseeland, wo sich ebenfalls Milli- ▷



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH: AMERICAN SCIENTIST UND DEM INTERNATIONALEN FORUM FÜR GRIPPE-AUFKLÄRUNG

Die Subtypen des Influenzavirus A werden nach Varianten des Oberflächenproteins Hämagglutinin (HA) unterschieden. Nur bei Vögeln kommen sie alle vor. Beim Menschen sind bisher fünf aufgetreten; H5 und H9 wurden aber noch nie von Mensch zu Mensch übertragen. Auch bei Schweinen und Robben entwickelten einige Subtypen keine artspezifischen Linien.

▷ onen von Zugvögeln aus Ostasien und Sibirien im Südsommer einfinden.

Das erstmalige Auftreten von H5N1 in einem afrikanischen Staat hängt nach Angaben des nigerianischen Agrarministers Adamu Bello gleichfalls eher mit illegalen Geflügeleinfuhren zusammen – vermutlich aus China oder der Türkei. Bezeichnenderweise brach die Krankheit in Nigeria in einer geschlossenen Legebatterie aus, was nicht über Zugvögel möglich ist: Sie muss also durch Menschen unfreiwillig eingeschleppt worden sein. Zudem ziehen im Winter keine Vögel aus Europa oder Nahost nach Westafrika.

Für den Sprung des Virus von Russland nach Rumänien und in die Türkei gibt es bis jetzt noch keine stimmige Rekonstruktion. Das Auftreten im Donau-Delta – einem der wichtigsten europäischen Rastplätze für Zugvögel – verstärkte allerdings den Verdacht gegen Wildvögel: Erstmals lag eine Übereinstimmung zwischen Zugrichtung, Zugzeit und Krankheitsausbruch vor.

Danach ging es Schlag auf Schlag: H5N1 sprang nach Griechenland über und von dort aus nach Italien, Slowenien sowie Österreich. Im Februar erreichte es schließlich auch Deutschland.

Dabei kam es aber nicht aus dem Süden, sondern überraschenderweise aus Nordosten. Nun befällt H5N1 hauptsächlich Wasservögel, Wachteln und Fasane. Aus Russland zogen jedoch im Herbst neben Saat- und Blässgänsen vor allem noch Greif-, Raben- oder Finkenvögel nach Westen – Gruppen, in denen H5N1 nicht bekannt war.

Die Höckerschwäne auf der Insel Rügen, die in Deutschland zunächst betroffen waren, bleiben unter normalen Bedingungen standorttreu. Allenfalls legen sie kürzere Strecken zurück – etwa vom Bottnischen Meerbusen in der östlichen Ostsee und aus dem Baltikum nach Rügen oder aus dem Schwarzmeergebiet und der Türkei nach Süditalien. Auslöser für einen möglichen Wegzug könnte das Zufrieren von Binnengewässern und Meeresbuchten im Osten Europas gewesen sein. Allerdings galten das Baltikum und Skandinavien im Februar als nicht von der Vogelgrippe betroffen.

Ein stilles Reservoir?

Franz Bairlein, Leiter des Instituts für Vogelforschung in Wilhelmshaven, hält es deshalb für möglich, dass im Körper der Schwäne und anderer Wasservögel schon länger ein H5N1-Virus schlummerte. Vielleicht infizierten sich die Tiere in Deutschland selbst – etwa bei anderen Wasservögeln, die sich zuvor schon woanders angesteckt, diese Virenaufnahme aber überlebt hatten. Erst der harte Winter in Europa und Nahrungsmangel schwächten die Schwäne dann derart, dass sie der Krankheit zum Opfer fielen. Der Haken daran: Es gibt trotz der Untersuchungen an Tausenden von Wildvögeln in Europa immer noch keine Anzeichen für ein solches stilles Reservoir oder eine entsprechende Mutation des Virus.

Da Wildvögel nach den bisherigen Erfahrungen meist innerhalb weniger Tage an H5N1 verenden, vermuten die Experten von Birdlife International, dass sich die in Slowenien, Italien und Griechenland gestorbenen Schwäne erst kurz vor ihrem Abflug angesteckt haben. Als Infektionsherd kommen mit Hühnerkot gedüngte Wiesen in Betracht, die es in Osteuropa zahlreich gibt. Die Viren können sich in Mist über Wochen halten.

Eine mögliche Seuchenquelle sind auch Gewässer, in denen Fische mit Geflügeldung gefüttert werden – eine gängige Praxis in Teilen Russlands, der Ukraine, Moldawiens und anderer Staaten Osteuropas. Mehrere der von der Vogelwarte Radolfzell und Birdlife International bislang erfassten Ausbrüche in Europa fanden just an Fischzuchtteichen statt – etwa in Kroatien oder Rumänien –, sodass auch diese Möglichkeit der Übertragung nicht ausgeschlossen werden kann.

Von den einheimischen Wasservögeln scheinen Schwäne am anfälligsten für die Vogelgrippe zu sein; bei den meisten europäischen Ausbrüchen gehörten sie zu den besonders auffallenden Opfern. Sie scheiden wohl vor und nach ihrem Tod kleine Mengen des Erregers aus. Ob sich andere Wildvögel daran anstecken können, ist bisher unbekannt. Zumindest dürfte das Infektionsrisiko dadurch aber nicht stark erhöht sein. Generell stellen wilde Enten oder Gänse ein bekanntes natürliches Reservoir für eine Vielzahl unterschiedlicher Grippenviren dar.

Insgesamt sind knapp 150 Vogelgrippestämme in Wildvögeln beständig virulent, wenn auch meist in geringem, wenig schädlichem Umfang. Es ist also durchaus möglich, dass nun ein modifiziertes H5N1 aufgetaucht ist, das in Zugvögeln nicht mehr in kürzester Zeit tödlich wirkt, wohl aber noch in Hausgeflügel. Beweise dafür fehlen allerdings.

Die Stallpflicht für Geflügel in der Europäischen Union, die Kontakte mit Wildvögeln unterbinden soll, ist trotzdem eine sinnvolle Maßnahme. Sehr viel wichtiger aber sind schärfere Kontrollen von Tiertransporten. Sie dürften das eigentliche Risiko darstellen.

Daniel Lingenhöhl ist freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

ÜBERTRAGUNGSWEGE

Ansteckungsrisiko für Haustiere

Die Vogelgrippe hat Deutschland erreicht; für das heimische Geflügel herrscht Stallpflicht. Für Vögel endet eine Infektion mit dem gefürchteten Erreger H5N1 fast immer tödlich. Doch wie steht es mit Katzen, Hunden und anderen Haustieren?

Von Andreas Jahn

Grippeviren nehmen es mit der Wirtsspezifität nicht besonders genau. Sie fühlen sich sowohl in Vögeln als auch in Säugetieren wohl, wobei besonders Schweine als »Mischgefäße« gefürchtet sind, in denen verschiedene Virenstämme ihr genetisches Sortiment untereinander austauschen, um dann neue Wirtsarten – wie den Menschen – zu attackieren.

Für die Erreger der Vogelgrippe – wozu auch H5N1 gehört – galt lange Zeit, dass sie sich auf Vögel und Schweine beschränken. Als jedoch H5N1 im Jahr 1997 zum ersten Mal beim Menschen nachgewiesen wurde, war diese Ansicht auf tragische Weise widerlegt.

Im Lauf der Zeit scheint das Virus sein Wirtsspektrum erweitert zu haben. Während es bis zum Jahr 2000 Mäusen noch nichts anhaben konnte, gelang es einzelnen Varianten ab 2001, sich auch in Nagern zu vermehren. Im Februar 2004 tauchte schließlich der Verdacht auf, dass auch Katzen von der Vogelgrippe infiziert werden können. Dies galt als äußerst ungewöhnlich, da die Raubtiere normalerweise gegen Grippe immun sind. Doch im Oktober desselben Jahres mussten in einem thailändischen Zoo 30 Tiger eingeschläfert werden, nachdem bereits 29 Artgenossen dem Erreger erlegen waren.

Die Großkatzen waren offensichtlich mit infiziertem Geflügel gefüttert worden und hatten dadurch große Mengen des Erregers aufgenommen. Die Arbeitsgruppe um die Virenexperten Albert Osterhaus und Thijs Kuiken am Erasmus Medical Center in Rotterdam wollte daraufhin wissen, ob auch unser heimischer Stubentiger gefährdet ist, und machte 2004 die Probe aufs Exempel.

Das Ergebnis der Forscher bestätigte den Verdacht. Alle drei Katzen, welche die Forscher H5N1 aussetzten, zeigten bereits nach einem Tag typische Symptome wie Fieber und Atemschwierigkeiten; ein Tier starb nach sechs Tagen. Dagegen blieben die Kontrolltiere, die mit dem Stamm H3N2 – einem der häufigsten Influenzavirenstämme des Menschen – infiziert wurden, erwartungsgemäß putzmunter.

Anfällige Katzen

Jetzt konnten die Wissenschaftler ihr Ergebnis erweitern. Sie steckten drei Katzen direkt mit H5N1 an; drei Tiere bekamen infiziertes Hühnerfleisch zu fressen, und zwei weitere hielten sich mit angesteckten Artgenossen auf. Alle sieben Katzen erkrankten *(American Journal of Pathology, Bd. 168, S. 176, 2006)*.

Und nicht nur das: Der Erreger beschränkte sich keineswegs auf Atemwege und Lunge, sondern fand sich auch in verschiedensten Geweben wie Darm, Leber, Nieren, Herz und Gehirn. Die angesteckten Tiere verbreiteten die Viren offensichtlich sowohl über die Atemluft als auch über den Kot.

»Würden wir das beim Menschen beobachten, hätten wir ein echtes Problem«, mahnt Osterhaus und ergänzt: »Es gibt offenbar die Möglichkeit, dass ein reines Vogelinfluenzavirus sich immer mehr an den Menschen anpasst, die Artgrenze überschreitet und direkt auf diesen überspringt.«

Auch Hunde scheinen nicht gänzlich gegen das Virus gefeit zu sein. Thailändische Wissenschaftler des Staatlichen Instituts für Tiergesundheit in Bangkok hatten 629 Hunde und 111 Katzen nach Antikörpern gegen H5N1 untersucht. Bei 160 Hunden und acht Katzen wurden sie fündig *(Nature, Bd. 439, S. 773, 2006)*.

Müssen wir nun befürchten, dass Bello und Mieze uns die Vogelgrippe ins Haus schleppen? Tatsächlich ist im Februar die erste Katze auf Rügen an der Vogelgrippe gestorben, nachdem sie offenbar einen mit H5N1 infizierten Vogel gefressen hatte. Dennoch weist das Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit darauf hin, dass Säugetiere sehr große Virusmengen aufnehmen müssen, um sich anzustecken. Und selbst wenn sie erkranken, scheiden sie kaum Viren aus.

Kuiken bestätigt diese Auffassung: »Verglichen mit dem Risiko, sich über Geflügel mit H5N1 zu infizieren, ist das Infektionsrisiko über Katzen sehr gering, weil viel mehr Vögel als Katzen in den betroffenen Gebieten infiziert sind, und weil Geflügel mehr Viren ausscheidet als Katzen. Dennoch muss man sich bewusst machen, dass Katzen infiziert sein und das Virus übertragen können.«

Andreas Jahn ist Redakteur bei spektrumdirekt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

In der Türkei gab es – teils tödliche – Infektionen von Menschen mit H5N1. Hier besucht Gesundheitsminister Recep Agdad ein erkranktes Mädchen in Van.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Zur herkömmlichen Massenproduktion von Grippeimpfstoff wird ein so genanntes Saatvirus, das die Antigene des pathogenen Erregers aufweist, in bebrütete Hühnereier eingespritzt, wo es sich vermehrt. Von da an dauert es noch rund drei Monate, bis schließlich der fertige Impfstoff vorliegt.

IMPFSTOFF

Wie schnell gäbe es genügend Pandemie-Impfstoff?

Eine schnelle Impfung großer Teile der Bevölkerung wäre der beste Schutz gegen eine Grippepandemie. Den Wettlauf mit der Zeit hoffen die Vakzinentwickler mit einer Reihe von Vorkehrungen zu gewinnen.

Von Achim G. Schneider

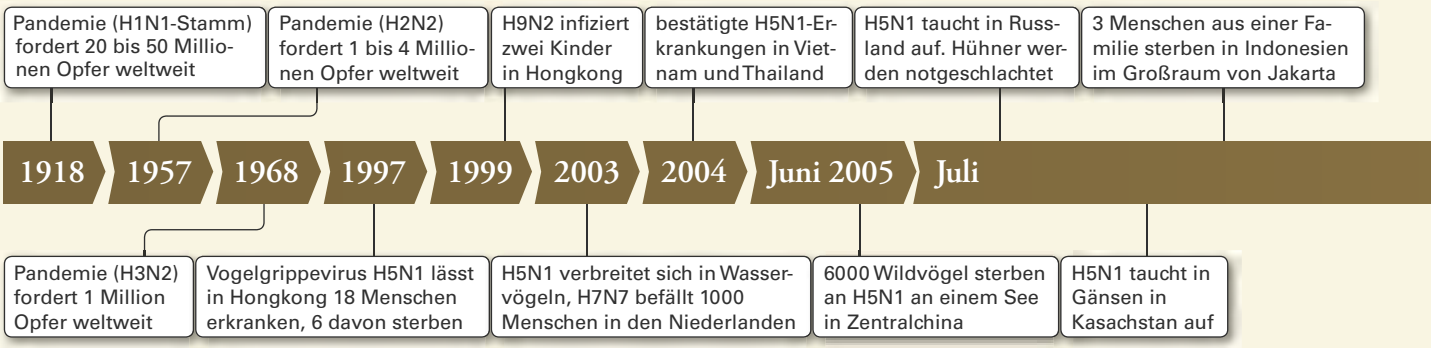
Obwohl sich das Vogelgrippevirus H5N1 unaufhaltsam ausbreitet, bleibt die Gefährdung für die menschliche Bevölkerung zunächst unverändert gering. Nach wie vor gibt nur ein enger Kontakt mit infizierten Vögeln dem Virus die Möglichkeit, die Artenbarriere zum Menschen zu überwinden – und dies war weltweit bis Anfang März dieses Jahres erst 175-mal nachweislich geschehen. Wenn H5N1 allerdings zu einer Variante mutiert, die sich leicht von Mensch zu Mensch verbreitet, droht eine Grippepandemie mit verheerenden Auswirkungen (Spektrum der Wissenschaft 1/2006, S. 72).

Die wirksamste Waffe wäre dann ein Vakzin. Es müsste so schnell wie möglich in großen Mengen zur Verfügung stehen. Eine vorsorgliche Produktion ist aber leider nicht möglich, weil der Erreger, gegen den geimpft werden soll, noch gar nicht existiert. Würde man einfach ein Vakzin gegen eine derzeit kursierende H5N1-Variante herstellen, wäre es gegen den danach noch weiter mutierten Pandemiestamm wahrscheinlich wenig wirksam.

Um das Dilemma aufzulösen, beschreiten die Europäer neue Wege. Erstmals können so genannte Prototypimpfstoffe zugelassen werden. In diese werden die Schlüsselkomponenten, die eine Immunantwort gegen den Erreger auslösen, erst nachträglich eingefügt – sobald der Pandemiestamm bekannt ist. So lässt sich das Zeit raubende Zulassungsverfahren schon vorab durchlaufen, und das Pandemievakzin ist sofort einsetzbar, wenn es vorliegt.

Zwei Impfstoffhersteller – Chiron Vaccines und GlaxoSmithKline – haben vor Kurzem bei der Europäischen Arzneimittelbehörde jeweils einen Antrag für einen solchen Prototyp eingereicht. Den von GlaxoSmithKline will das Paul-Ehrlich-Institut bis Ende März bewertet haben. Verläuft alles nach Plan, so könnte im zweiten Quartal dieses Jahres das erste Prototypvakzin gegen ein Pandemievirus in der Europäischen Union zugelassen sein.

Allerdings wäre es auch dann noch ein Problem, in kurzer Zeit die benötigten großen Impfstoffmengen herzustellen. Die weltweite Kapazität zur Produktion des gewöhnlichen saisonalen Grippevakzins beträgt momentan ungefähr



300 Millionen Dosen. Das würde lediglich für einen Bruchteil der Weltbevölkerung reichen.

Mit zwei Kunstgriffen, die bei der Herstellung des Prototypvakzins schon erprobt wurden, will man deshalb im Ernstfall bei gleicher Kapazität die Impfstoffproduktion verzehnfachen. Zum einen soll das benötigte Impfmaterial mit zusätzlichen immunstimulierenden Substanzen, so genannten Adjuvanzien, gestreckt werden. Außerdem will man anstelle der heute üblichen Spaltprodukte des Erregers vollständige inaktivierte Viren einsetzen. Weil in diesem Fall die Trennung in die Bestandteile und deren Aufreinigung nicht mehr erforderlich sind, entfallen die dadurch verursachten Materialverluste.

Der Pandemieimpfstoff würde allerdings noch auf konventionelle Art hergestellt. Nachdem der Erreger bekannt ist, wäre der nächste Schritt, durch Einfügen der Schlüsselkomponenten in das Prototypvirus ein so genanntes Saatvirus herzustellen. Dafür veranschlagen die Experten etwa acht Wochen.

Das Saatvirus würde dann in bebrütete Hühnereier injiziert, wo es sich vermehrt. Nach rund drei Monaten stünde so genügend Vakzin zur Verfügung, um die gesamte Bevölkerung Deutschlands einmal zu impfen. Nach weiteren sechs Wochen könnte die zweite für einen vollständigen Immunschutz notwendige Impfung erfolgen.

Für eine erste Pandemiewelle wäre das möglicherweise trotz allem zu spät. Deshalb gibt es intensive Bemühungen, die Viren in Zellkulturen zu vermehren. Dadurch ließe sich die Produktion erheblich beschleunigen. Solche Verfahren dürften aber erst mittelfristig zur Verfügung stehen.

Achim G. Schneider ist promovierter Biologe und freier Wissenschaftsjournalist bei Freiburg.

VIROLOGIE

Der gefährliche Typ H5N1

Das Vogelgrippevirus mit dem kryptischen Namen H5N1 beherrscht derzeit die Schlagzeilen und weckt schlimme Befürchtungen. Wie gefährlich ist dieser Erreger für Tier und Mensch?

Von Andreas Jahn

Bei der Vogelgrippe, auch Geflügelpest oder aviäre Influenza genannt, handelt es sich um eine Tierseuche – nicht mehr, aber auch nicht weniger. Bekannt ist die weltweit verbreitete Krankheit bereits seit dem Ende des 19. Jahrunderts, als es in Italien zu einem Ausbruch kam.

Die Wissenschaftler unterscheiden die niederpathogene aviäre Influenza, bei der das Geflügel nur unter leicht zerzausten Federn leidet und etwas weniger Eier legt, von der hochpathogenen Form, bei der fast alle angesteckten Tiere innerhalb kurzer Zeit verenden. Das jetzt grassierende H5N1-Virus gehört leider zum letzteren Typ.

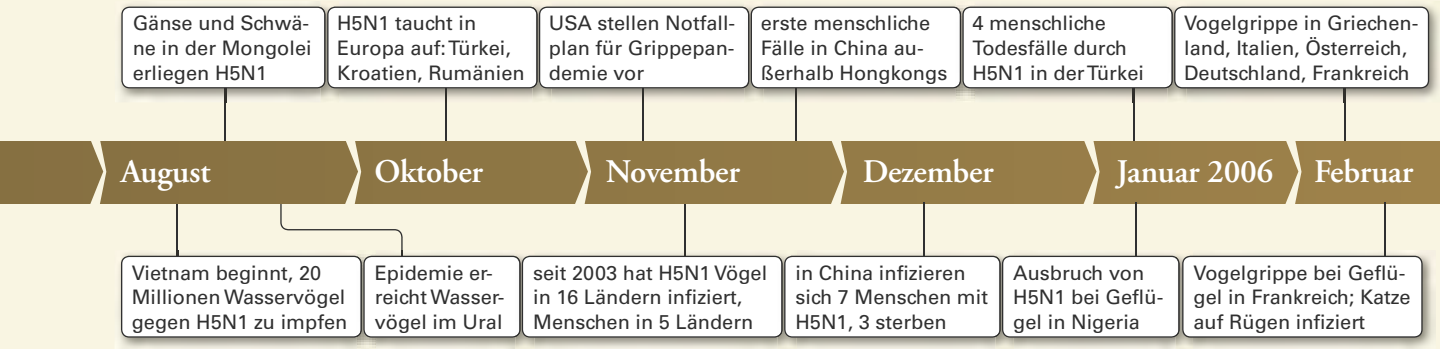
Seinen kryptischen Namen verdankt der zu den Influenza-A-Viren zählende Erreger den Proteinen Hämagglutinin und Neuraminidase, die auf seiner Oberfläche sitzen und außerordentlich variabel sein können. Bisher sind 16 H- und 9 N-Subtypen bekannt (siehe Kasten auf S. 34) – der erste beschriebene Subtyp H1N1 hat übrigens die »Spanische Grippe« von 1918/19 ausgelöst, an der mindestens 20, vielleicht sogar 50 Millionen Menschen gestorben sind.

Als natürliches Reservoir für Influenza-A-Viren gelten Wasservögel, von denen der Erreger auf andere Wirte überspringen kann. Aviäre Influenzaviren beschränken sich normalerweise auf Vögel und Schweine. Im Jahr 1997 konnte H5N1 jedoch in Hongkong auch bei Menschen nachgewiesen werden. Laut Angaben der Weltgesundheitsorganisation WHO hatten sich bis Anfang März, als dieses Heft in Druck ging, 175 Menschen mit dem Virus infiziert, wovon 96 gestorben sind.

Die Ansteckung erfolgte vermutlich ausschließlich über den engen Kontakt mit infizierten Tieren; eine direkte Übertragung von Mensch zu Mensch gilt als unwahrscheinlich – jedenfalls derzeit noch. Erhitztes Geflügel erscheint ebenfalls harmlos, und wer halb rohes Hühnerfleisch zu sich nimmt, dürfte eher Probleme mit Salmonellen als mit H5N1 bekommen. Die verordnete Stallpflicht dient somit in erster Linie dem Schutz des Federviehs.

H5N1 stellt also noch keine unmittelbare Bedrohung für den Menschen dar. Doch Grippeviren haben sich in der Vergangenheit als höchst wandlungsfähig erwiesen und tauschen auch gerne Gene untereinander aus. Experten befürchten daher, dass aus einer Doppelinfektion mit H5N1 und einem humanpathogenen Grippevirus ein tödlicher Mix entstehen könnte. Da außerdem seit den großen Grippepandemien des 20. Jahrhunderts, die 1918, 1957 und 1968 über den Erdball rasten, ein erneuter Ausbruch überfällig zu sein scheint, dürfte uns H5N1 noch längere Zeit beschäftigen.

Andreas Jahn ist Redakteur bei spektrumdirekt.



ARZNEIMITTEL

Wie wirken Grippemedikamente?

Weil es noch keine Impfstoffe gegen ein mögliches Grippepandemievirus gibt, müssten wir im Ernstfall auf Medikamente zurückgreifen: die so genannten Neuraminidase-Hemmer.

Von Volker Weinl

Auslöser der verheerenden »Spanischen Grippe« von 1918 war ein direkt von Vögeln auf den Menschen übergesprungenes Virus. Es gehörte ebenso wie die aktuelle Variante zu den Influenzaviren der Gruppe A. Diese Erreger besitzen keine DNA, sondern RNA in acht separaten Einzelsträngen als Erbgut. Für die Infektion entscheidend sind zwei in die Membran der Virusteilchen eingebaute Proteine: das Hämagglutinin und die Neuraminidase. Anhand verschiedener Spielarten dieser Eiweißstoffe können Forscher die Erreger auch klassifizieren – das Vogelgrippevirus aus Fernost eben als Typ H5N1.

Hämagglutinin verknüpft sich mit typischen Zellmembranmolekülen, den Sialinsäuren, und verschafft dem Virus so Eintritt in die Wirtszelle. Diese Bindung stört aber später beim Austritt der neu gebildeten Virusteilchen: Diese könnten dadurch mit den Oberflächen ihrer Wirtszellen verkleben, worauf sie vom Immunsystem eliminiert würden. Die Neuraminidase verhindert dies, indem sie die Sialinsäuren abschneidet. Erst dann kann sich das Influenzavirus auf den Weg machen, neue Zellen zu infizieren.

Die Neuraminidase-Hemmer blockieren dieses Freischneideenzym. Wie zahlreiche Studien belegen, schwächen sie so den Verlauf von Infektionen ab – und zwar sowohl von solchen mit gewöhnlichen Influenzaviren als auch von denen mit Erregern, die Vögel befallen. Voraussetzung dafür ist, dass sie rechtzeitig, das heißt innerhalb von 48 Stunden nach den ersten Symptomen, eingenommen werden.

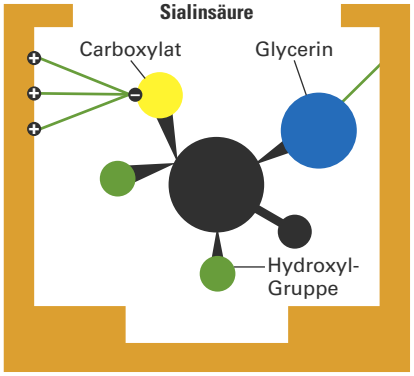
Neuraminidase-Hemmer könnten im Fall einer Pandemie, wenn es H5N1 gelingen sollte, von Mensch zu Mensch zu springen, die Ausbreitung in der Bevölkerung bremsen. Ein effektiver Impfstoff lässt sich nämlich erst produzieren, wenn das mutierte Virus bekannt ist. Dies kann mehrere Monate dauern – bis dahin müssen Neuraminsäure-Hemmer, quasi als erste Verteidigungslinie, die gefährdeten Personengruppen schützen.

Bisher sind zwei solche Medikamente zugelassen: Tamiflu® von Hoffmann-La Roche und das zu inhalierende Relenza® von GlaxoSmithKline. Die Vorräte der deutschen Behörden an den beiden Arzneimitteln decken, von Bundesland zu Bundesland schwankend, derzeit etwa zehn Prozent der Bevölkerung ab. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfiehlt dagegen zwanzig Prozent.

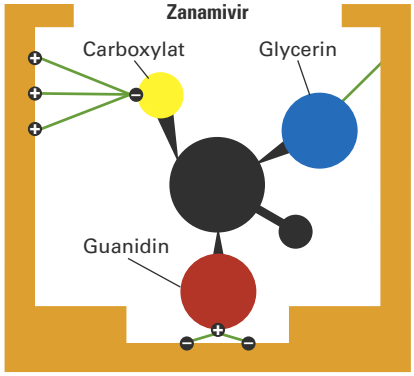
Kürzlich berichteten Forscher von einem mit Vogelgrippe infizierten vietnamesischen Mädchen, bei dem eine zehnfach höhere Tamiflu-Dosis als üblich notwendig war, um das Virus zu bekämpfen. Es scheine, als sei H5N1 dabei, eine Resistenz zu entwickeln, kommentierte der leitende Forscher Yoshihiro Kawaoka von der Universität von Wisonsin in Madison. Dann könnte sich die erste Verteidigungslinie gegen eine Pandemie als löchrig erweisen. ◁

Volker Weinl ist Diplombiologe und Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

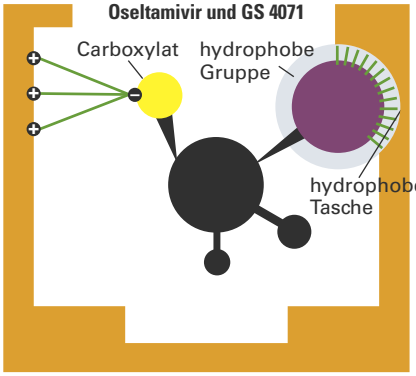
Das Blockadeprinzip



Die Antigrippewirkstoffe blockieren das katalytische Zentrum der Neuraminidase (orange), weil sie sich dort fester verankern als die eigentlich vom Enzym zu bearbeitende Sialinsäure. Diese wird hauptsächlich durch Wechselwirkungen (grüne Linien) ihres Glycerin- und Carboxylat-Rests mit Aminosäuren an der Wand des Spalts festgehalten.



Zanamivir, der Wirkstoff des Medikaments Relenza®, trägt anstelle der Hydroxyl-Gruppen der Sialinsäure ein Guanidin; diese große, positiv geladene Gruppe geht eine zusätzliche starke Bindung mit zwei negativ geladenen Aminosäuren am Grund des Spalts ein.



Oseltamivir, der Wirkstoff von Tamiflu®, wird im Körper in GS 4071 umgewandelt; in dieser Form kann er sich – wiederum wie die Sialinsäure – über einen Carboxylat-Rest an die Spaltwand heften. Eine neu eingeführte hydrophobe (Wasser meidende) Gruppe lässt im aktiven Zentrum des Enzyms eine ähnlich geartete Tasche entstehen, in der sich der Wirkstoff über hydrophobe Wechselwirkungen (kurze grüne Striche) zusätzlich festhalten kann.

BRYAN CHRISTIE NACH: R. SCOTT ROWLAND, BIOCRYST PHARMACEUTICALS, INC.

Das Echo der Schwarzen Löcher

Schallwellen verhalten sich in Flüssigkeiten verblüffend ähnlich wie Lichtwellen in der gekrümmten Raumzeit. Akustische Modelle Schwarzer Löcher könnten Forschern Hinweise für die Entwicklung einer Theorie der Quantengravitation liefern.

Von Theodore A. Jacobson und Renaud Parentani

Als Albert Einstein 1905 die Spezielle Relativitätstheorie veröffentlichte, verwarf er die aus dem 19. Jahrhundert stammende Idee, dass es sich beim Licht um die Schwingungen eines hypothetischen Mediums, des »Äthers«, handele. Während Schallwellen mechanische Schwingungen in Medien wie Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern sind, breitet sich das Licht demzufolge ohne jede materielle Unterstützung aus. An dieser Vorstellung haben die beiden anderen Grundpfeiler der modernen Physik, die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenmechanik, nichts geändert. Von subatomaren Strukturen bis zu kosmologischen Dimensionen stehen Beobachtungen im Einklang mit diesen drei Theorien.

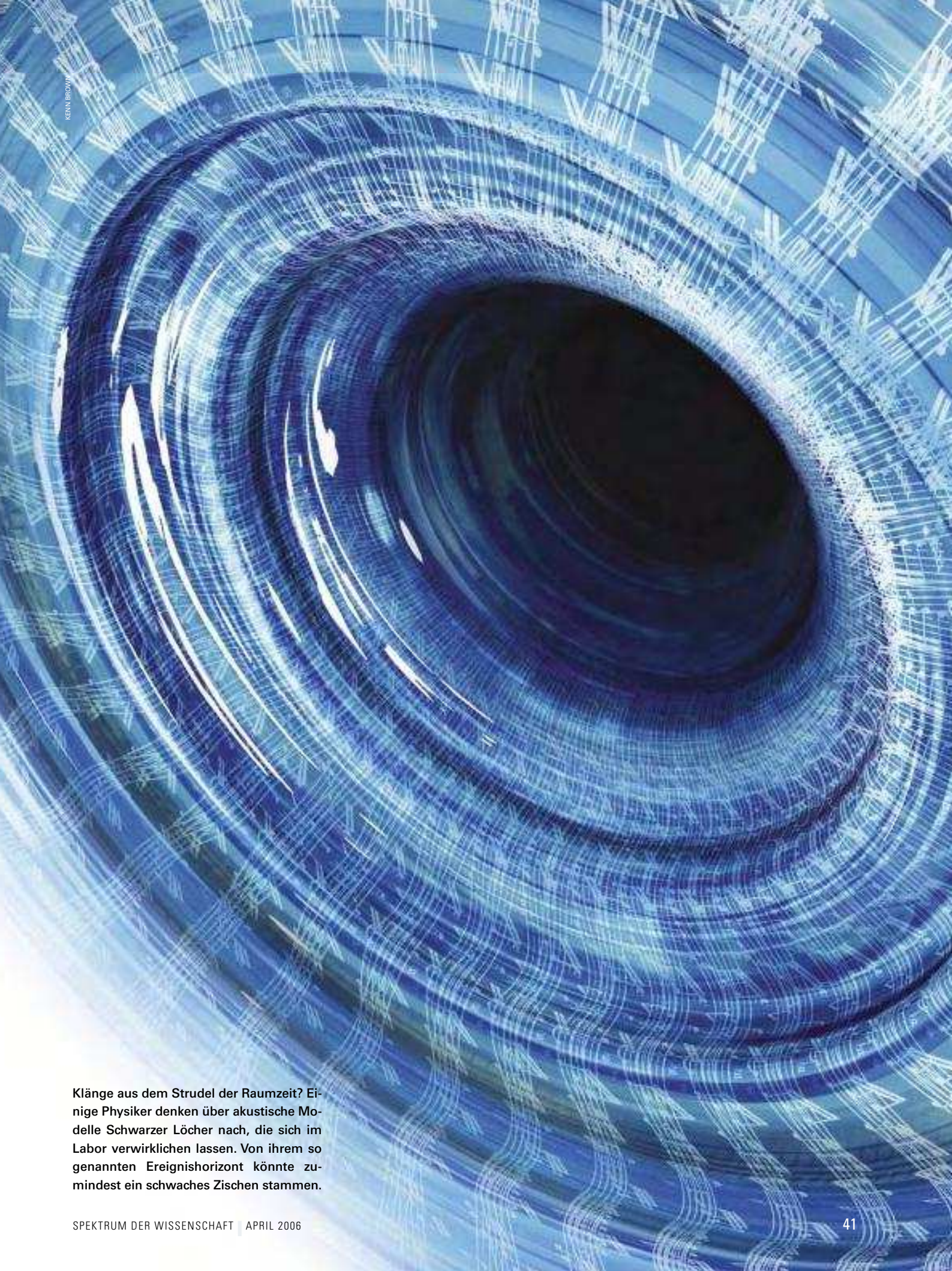
Dennoch rätseln die Physiker über ein grundlegendes Problem. Die Schwerkraft, die in der Allgemeinen Relativitätstheorie als Krümmung der Raumzeit beschrieben wird, ließ sich bis heute nicht mit der Quantentheorie zu einer Theorie der Quantengravitation vereinen. Auf sehr kleinen Längen sollte es der Quantenmechanik zufolge außerordentlich stark gekrümmte Raumzeiten geben. Mit ihrem Versuch, diese Strukturen zu verstehen, sind Theoretiker bislang jedoch nur im Schneckentempo vorangekommen. Einige Wissenschaftler schöpfen neue Hoffnung aus der Parallele zu einem besser verstandenen Forschungsgebiet: der Physik der kondensierten Materie, also dem Studium von Flüssigkeiten und Festkörpern.

Akustische Modelle

In einem größeren Maßstab betrachtet, erscheinen uns sowohl Flüssigkeiten und Festkörper als auch die Raumzeit als ein Kontinuum. Doch während die mikroskopische Struktur der Raumzeit rätselhaft ist, verstehen Physiker die von der Quantenmechanik geprägte kondensierte Materie bereits recht gut. Die Ausbreitung von Schall in einer inhomogenen Flüssigkeit scheint der Ausbreitung von Licht in einer gekrümmten Raumzeit auf erstaunliche Weise zu ähneln.

Gemeinsam mit unseren Kollegen versuchen wir, diese Analogie zu nutzen, indem wir auf der Grundlage der Ausbreitung von Schallwellen Modelle Schwarzer Löcher entwickeln. Daraus erhoffen wir uns neue Einsichten in die mikroskopische Beschaffenheit der Raumzeit. Unsere bisherige Arbeit deutet darauf hin, dass die Raumzeit körnig sein könnte und damit einer Flüssigkeit ähnelt, die aus Molekülen einer charakteristischen Größe besteht. Das steht im Widerspruch zu Einsteins Annahmen.

Für die Erforschung der Quantengravitation sind Schwarze Löcher besonders geeignete Studienobjekte, weil bei ihnen sowohl die Quantentheorie als auch die Allgemeine Relativitätstheorie ein wichtige Rolle spielt. Als Stephen W. Hawking ▷



KENN BROWN

Klänge aus dem Strudel der Raumzeit? Einige Physiker denken über akustische Modelle Schwarzer Löcher nach, die sich im Labor verwirklichen lassen. Von ihrem so genannten Ereignishorizont könnte zumindest ein schwaches Zischen stammen.

MIT FRDL. GEN. VON W. UNRUH

William Unruh erkannte Anfang der 1980er Jahre, dass man Modelle Schwarzer Löcher entwickeln könnte, die auf der Ausbreitung von Schallwellen beruhen.

von der Universität Cambridge im Jahr 1974 die Quantentheorie auf den so genannten Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs anwandte, war das ein wichtiger Schritt zur Vereinigung der beiden Theorien. Der Allgemeinen Relativitätstheorie zufolge ist dieser Horizont die Fläche, die das Innere des Schwarzen Lochs – der Bereich, aus dem auf Grund der starken Schwerkraft nichts entkommen kann – von der Außenwelt abtrennt. Dabei handelt sich aber nicht um eine materielle Grenze. Ein Beobachter, der in ein Schwarzes Loch fällt, würde bei der Durchquerung des Ereignishorizonts nichts Besonderes bemerken. Hat er jedoch diese Grenze überschritten, so kann er keine Lichtsignale mehr an die Außenwelt schicken – und erst recht nicht mehr selbst dorthin zurückkehren. Beobachter in der Außenwelt würden nur diejenigen Signale empfangen, die ihr hineinfallender Kollege bis kurz vor der Durchquerung des Horizonts ausgesandt hat. Beim »Hinausklettern« aus dem Trichter des Gravitationspotenzials des Schwarzen Lochs würden die Lichtwellen gedehnt. Den fernen Beobachtern erschiene der Fall ihres Kollegen verlangsamt.

Rotverschiebung und Zeitdilatation auf Grund der Gravitation gibt es nicht nur bei Schwarzen Löchern. Auch die Funksignale zwischen Bodenstationen und Satelliten werden davon beeinflusst. So funktioniert das Global Positioning System (GPS) nur dann zuverlässig, wenn dieser Effekt berücksichtigt wird. Im Gegensatz dazu wachsen Rotverschiebung und Zeitdilatation der Signale, die ein Reisender beim Erreichen des Ereignishorizonts eines Schwarzen Lochs aussendet, bis ins Unendliche. Während Beobachter in der Außenwelt den Fall ihres Kollegen zum Ereignishorizont als unendlich verlangsamt wahrnehmen, vergeht für diesen nur eine endliche Zeit.

Strahlung wie von glühenden Kohlen

Bis jetzt sind wir davon ausgegangen, dass es sich beim Licht um ein klassisches Wellenphänomen handelt. Hawking hat untersucht, was am Ereignishorizont passiert, wenn man die Quantennatur des Lichts berücksichtigt. Der Quantentheorie zufolge ist selbst ein perfektes Vakuum niemals vollkommen leer, sondern ständig von Fluktuationen erfüllt – eine Auswirkung der Heisenberg'schen Unschärferelation. Diese Fluktuationen können etwa als Paare virtueller Photonen veranschaulicht werden. Physiker bezeichnen die Photonenpaare als virtuell, weil sie ohne die Anwesenheit von Störungen so schnell entstehen und wieder verschwinden, dass sie nicht beobachtet werden können.

In der stark gekrümmten Raumzeit in der Nähe eines Schwarzes Lochs ändert sich dieses Bild. Hier kann man erwarten, dass es Paare geben kann, von denen ein Photon innerhalb des Ereignishorizonts gefangen bleibt, während das andere Photon in die Außenwelt entkommt. Nur gemeinsam könnte das in einer Fluktuation entstandene Photonenpaar wieder vernichtet werden, und so wird das Photon der Außenwelt zum Teil einer Strahlung, die vom Schwarzen Loch ausgeht. Diese Hawking-Strahlung müsste das Schwarze Loch allmählich schrumpfen lassen. Ihr Spektrum ist »thermisch«, ähnelt also der Strahlung glühender Kohlen, wobei die der Strahlung entsprechende Temperatur umgekehrt proportional zur Masse des Schwarzen Lochs ist. Wenn das Schwarze Loch keine Masse oder Energie von außen aufnimmt, sollte sich auf diese Weise praktisch die gesamte Masse des Schwarzen Lochs irgendwann in Hawking-Strahlung umwandeln.

Physiker sind sich darin einig, dass die Hawking-Strahlung von einer gültigen Theorie der Quantengravitation erklärt werden muss. Für eine solche Theorie gibt es mehrere Kandidaten. Am meisten diskutiert werden gegenwärtig die Stringtheorie (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2006, S. 36) und die Theorie der Loop-Quantengravitation (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 54).

Zwar akzeptieren die meisten Physiker Hawkings Vorhersage, doch ist es bislang nicht gelungen, die nach ihm benannte Strahlung zu beobachten. Für einen direkten Nachweis wäre die von stellaren Schwarzen Löchern im Milchstraßensystem und den Zentren naher Galaxien erwartete Hawking-Strahlung viel zu schwach. Besser stehen die Chancen, diese Strahlung bei Schwarzen Minilöchern nachzuweisen, die aus der Frühzeit des Universums übrig geblieben sind oder sich vielleicht sogar in Teilchenbeschleunigern herstellen lassen (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2005, S. 32).

IN KÜRZE

- In den 1970er Jahren behauptete der Physiker Stephen W. Hawking, dass **Schwarze Löcher nicht vollkommen schwarz** sind. Vielmehr sollten sie eine thermische Strahlung aussenden, die auf Quantenfluktuationen am Ereignishorizont beruht. Seine Theorie führt aber auf ein Problem: Wenn die Hawking-Strahlung das Schwarze Loch verlässt, müssten ihre Wellen unendlich gedehnt werden und einer unendlich kleinen Region entstammen – doch hier sind Auswirkungen der noch unbekannten Quantengravitation zu erwarten.
- Mit **akustischen Modellen Schwarzer Löcher** untersuchen Physiker dieses Problem. Sie nutzen die Ähnlichkeit zwischen der Wirkung einer strömenden Flüssigkeit auf Schall und derjenigen eines Schwarzen Lochs auf Licht.
- In Flüssigkeiten müssen Schallwellen länger als der Abstand zwischen den Molekülen sein. Besteht auch die Raumzeit aus kleinsten Teilchen, so würde die Hawking-Strahlung einer endlich großen Region entstammen und beim Verlassen des Schwarzen Lochs nur endlich gedehnt werden. Die Beobachtung der Strahlung könnte **Hinweise auf die Körnigkeit** der Raumzeit liefern.

Dass diese Strahlung bisher nicht beobachtet werden konnte, ist ärgerlich, weil Hawkings Theorie auch Schwächen aufweist. Eine davon betrifft die Behauptung, die Photonen würden beim Überschreiten des Ereignishorizonts eine unendliche Rotverschiebung erleiden. Das Problem damit wird deutlich, wenn man in einem Gedankenexperiment die Emission eines Photons der Hawking-Strahlung zurückverfolgt und für diesen Zweck die Zeitrichtung umkehrt. Nähert sich in dieser Betrachtung das Photon dem Schwarzen Loch, so schrumpft seine Wellenlänge und es wird blauverschoben. Je weiter wir in der Zeit zurückgehen, desto näher kommt das Photon dem Ereignishorizont und desto kürzer wird seine Wellenlänge. Wird die Wellenlänge schließlich sehr viel kürzer als der Durchmesser des Schwarzen Lochs, vereinigt sich das Photon mit seinem Partner zu einem Paar virtueller Photonen.

Raumzeit unterm Mikroskop

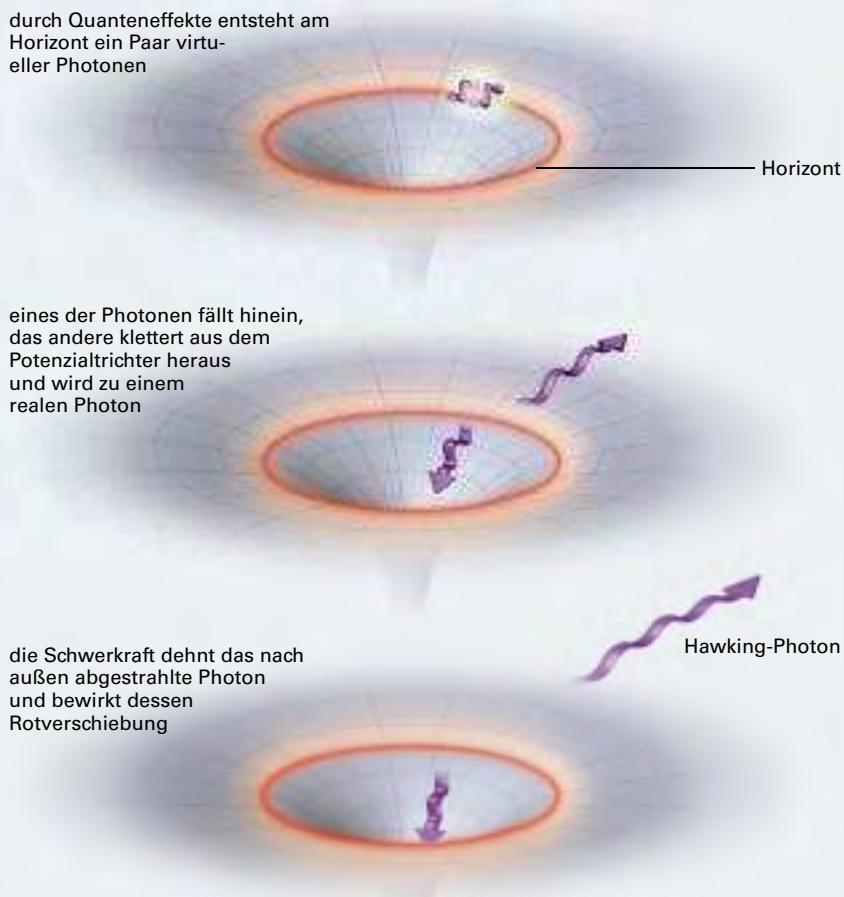
Die Blauverschiebung wächst immer weiter, je kleiner der Abstand zum Horizont wird. Doch bei Abständen unterhalb der so genannten Plancklänge von 10^{-35} Metern kann weder die Relativitätstheorie noch die Quantentheorie vorhersagen, was mit dem Teilchen geschieht. Dafür brauchen wir eine Theorie der Quantengravitation.

Der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs erweist sich somit als ein gigantisches Mikroskop, das uns zu einer noch unbekannten Physik führt. Wenn Hawkings Vorhersage jedoch auf noch unbekannter Physik beruht, müssen wir dann nicht an ihrer Gültigkeit zweifeln? Könnten die Eigenschaften der Hawking-Strahlung (und vielleicht sogar ihre Existenz) von mikroskopischen Eigenschaften der Raumzeit abhängen, so wie auch die Wärmekapazität oder die Schallgeschwindigkeit eines Stoffs von dessen Mikrostruktur abhängt? Oder beruht der Effekt ausschließlich auf der Masse und dem Drehimpuls des Schwarzen Lochs, wie Hawking behauptet?

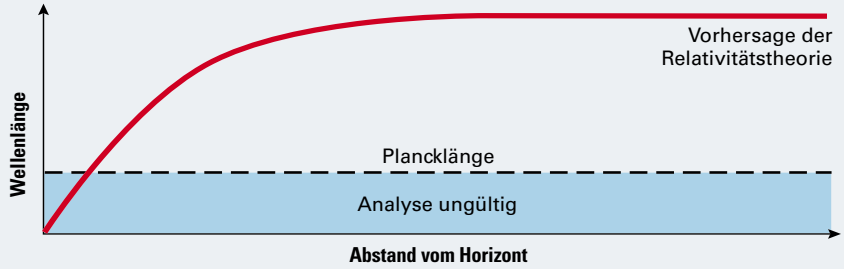
Ein erster Schritt zur Beantwortung dieser Fragen gelang William Unruh (siehe Foto links oben) von der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada) bereits 1981. Er zeigte, dass es eine Ähnlichkeit zwischen der Ausbreitung von Schall in einer bewegten Flüssigkeit und der Lichtausbreitung in einer ge- ▷

Hawking im Irrtum?

Eines der größten Rätsel der Schwarzen Löcher ist ein Schönheitsfehler in der Theorie, die den Physiker Stephen W. Hawking berühmt machte. Er behauptete, dass diese Objekte Strahlung aussenden. Sie weisen einen Ereignishorizont auf, der eine kosmische Einbahnstraße markiert. Zwar können Dinge von außen hineinfallen, doch nicht einmal Licht kann aus dem Innern dort nach außen gelangen. Hawking untersuchte, was passiert, wenn unmittelbar am Horizont Paare virtueller Teilchen entstehen. Der Quantentheorie zufolge sollten solche Paare im leeren Raum fortwährend entstehen und vergehen.



Die Relativitätstheorie sagt voraus, dass die Wellenlänge eines vom Ereignishorizont nach außen abgestrahlten Photons unendlich gedehnt wird. Beobachtete Photonen müssten demnach mit einer verschwindend kurzen Wellenlänge entstanden sein. Das ist eine widersprüchliche Vorstellung, weil man für Längen, die kürzer als die Plancklänge von 10^{-35} Metern sind, unbekannte Auswirkungen der Quantengravitation erwartet. Physiker versuchen Modelle Schwarzer Löcher zu entwickeln, die im Labor realisierbar sind. Vielleicht lässt sich damit herausfinden, ob sie tatsächlich Strahlung aussenden.



ALLE GRAFIKEN DIESES ARTIKELS: GEORGE RETSECK

Wellen in strömendem Wasser ähneln Lichtwellen in der Raumzeit. Ist die Strömung ungleichförmig, dann werden die Wellenzüge verformt und die Wellenlängen gedehnt oder gestaucht. Etwas Vergleichbares geschieht, wenn Licht einen Stern oder einen Planeten passiert. Wenn das Wasser sehr schnell fließt, können sich die Wellen nicht entgegen der Strömung ausbreiten – ähnlich wie Licht nicht aus einem Schwarzen Loch entkommen kann.

BOB FOSBURY

krümmten Raumzeit gibt, und schlug vor, auf diese Weise den Einfluss der Mikrophysik auf die Hawking-Strahlung zu untersuchen. Unruh spekulierte, dass sich im Labor vielleicht sogar Phänomene erzeugen ließen, die der Hawking-Strahlung ähneln.

Trotz Unterschieden haben Lichtwellen und Schallwellen immerhin einiges gemeinsam. Beide lassen sich durch ihre Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit charakterisieren. Das Konzept einer Schallwelle ist dabei nur dann sinnvoll, wenn die Wellenlänge erheblich größer ist als der Abstand zwischen den Molekülen der Flüssigkeit. Auf kürzeren Abständen kann es keine akustischen Wellen geben. Diese Beschränkung macht die Analogie zwischen Licht und Schall für uns interessant. Sie erlaubt es, makroskopische Folgen der Mikrostruktur zu untersuchen.

Um für uns wirklich nützlich zu sein, müsste sich die Analogie allerdings auch bis in den Quantenbereich erstrecken. In unserem Alltag verhindert die ungeordnete Wärmebewegung der Moleküle, dass sich Schallwellen wie Lichtquanten verhalten können. Nähert sich die Temperatur der Flüssigkeit jedoch dem absoluten Nullpunkt, so kann es auch zu einer Quantisierung des Schalls kommen. Physiker sprechen in diesem Fall von »Phononen« (Schallquanten) und betonen damit die Analogie zu den Lichtteilchen, den Photonen. Die Beobachtung von Phononen in Kristallen sowie in Stoffen, die – wie etwa Helium – bei tiefen Temperaturen flüssig sind, ist für Experimentalphysiker längst zur Routine geworden.

Schall und Licht auf krummen Wegen

In einer ruhenden oder gleichmäßig bewegten Flüssigkeit verhalten sich Phononen ähnlich wie Photonen in einer flachen Raumzeit ohne Gravitation. Die Phononen breiten sich geradlinig aus, ihre Wellenlänge, Frequenz und Geschwindigkeit ändern sich nicht. Ebenso gelangt in einem Schwimmbecken oder einem gleichmäßig strömenden Fluss der Schall auf direktem Weg von seiner Quelle bis zu unseren Ohren.

Im Gegensatz dazu ändert sich in einer Flüssigkeit, die sich ungleichförmig bewegt, auch die Geschwindigkeit der Phononen. Dabei kann ihre Wellenlänge gestreckt oder gestaucht werden, genau wie bei Photonen in einer gekrümmten Raumzeit. In einem Fluss, der in eine enge Schlucht strömt, oder in Wasser, das einen Abfluss hinabwirbelt, folgt der Schall einem gekrümmten Weg, genau wie Licht im Gravitationsfeld eines Sterns. Die Ausbreitung des Schalls lässt sich in diesen Fällen sogar mit den geometrischen Methoden der Allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben.

Noch erstaunlicher ist, dass wir die Wirkung einer strömenden Flüssigkeit auf Schall mit derjenigen eines Schwarzen Lochs auf Licht vergleichen können. Ein akustisches Schwarzes Loch kann mit Hilfe einer so genannten Laval-Düse realisiert werden, wie sie in Raketenantrieben benutzt wird. Diese Düse ist so geformt, dass die hindurchströmende Flüssigkeit an ihrer engsten Stelle mit Überschallgeschwindigkeit fließt, ohne dabei eine Stoßwelle zu erzeugen. Die Geometrie der Schallausbreitung ähnelt dann sehr stark der Lichtausbreitung in der Raumzeit-Geometrie eines Schwar-

Licht und Schall

Wellenart	klassische Beschreibung	Quanten-beschreibung	Geschwindigkeit	Warum verläuft die Ausbreitung gekrümmt?	Grenze der Beschreibung
Licht	schwingende elektrische und magnetische Felder	elektromagnetisches Photon	300 000 Kilometer pro Sekunde (im Vakuum)	Krümmung der Raumzeit durch Materie und Energie	Plancklänge (10^{-35} Meter)
Schall	kollektive Bewegung von Molekülen	akustisches Phonon	1500 Meter pro Sekunde (in Wasser)	Variationen von Geschwindigkeit und Richtung der Strömung	typischer Abstand der Moleküle (10^{-10} Meter für Wasser)

zen Lochs, wobei der Überschallbereich seinem Innern entspricht. Schallwellen, die sich entgegen der Strömungsrichtung ausbreiten, werden von der Strömung mitgerissen – ähnlich wie Licht, das in Richtung auf das Zentrum des Schwarzen Lochs gezogen wird. Die Unterschallregion entspricht dem Äußeren des Schwarzen Lochs. Hier können sich Schallwellen auch entgegen der Strömung bewegen, werden aber dabei gestreckt, so wie das Licht rotverschoben wird. Der akustische Ereignishorizont als Grenze zwischen den beiden Regionen verhält sich genauso wie der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs.

Schwaches Zischen vom Horizont

Wenn die Flüssigkeit kalt genug ist, erstreckt sich die Analogie auch auf die Quantenebene. William Unruh folgerte 1981, dass am akustischen Ereignishorizont thermische Phononen ausgesandt werden müssten, die den thermischen Photonen der Hawking-Strahlung ähneln. Quantenfluktuationen in der Umgebung des Horizonts würden Paare von Phononen erzeugen, von denen eines in der Überschallregion von der Strömung mitgerissen würde, das andere jedoch entgegen der Strömung entkommt und dabei gestreckt würde. Mit einem vor der Düse angebrachten Mikrofon ließe sich dann ein schwaches Zischen aufnehmen. Die Schallenergie dieses Zischens würde der kinetischen Energie der strömenden Flüssigkeit entstammen.

Die dominante Frequenz dieses Rauschens hängt von der Geometrie der Düse ab. Die typische Wellenlänge der aufgespürten Phononen entspricht der Länge, auf der sich die Strömungsgeschwindigkeit merklich ändert. Da diese Länge wesentlich größer als der Abstand zwischen den Molekülen ist, nahm Unruh zunächst an, dass die Flüssigkeit homogen und kontinuierlich ist. Aus der Nähe des akustischen Ereignishorizonts müssten jedoch Phononen mit derart kurzen Wellenlängen stammen, dass sie die Körnigkeit der Flüssigkeit, also ihre Zusammensetzung aus Molekülen, spüren sollten.

Es ist plausibel, dass wir über diese Analogie etwas Neues über die Schwarzen Löcher der Raumzeit erfahren können. Das war der Ansporn für Theoretiker, neben Unruhs Überschallmodell weitere Analogien für Schwarze Löcher vorzuschlagen (siehe Kasten auf S. 46).

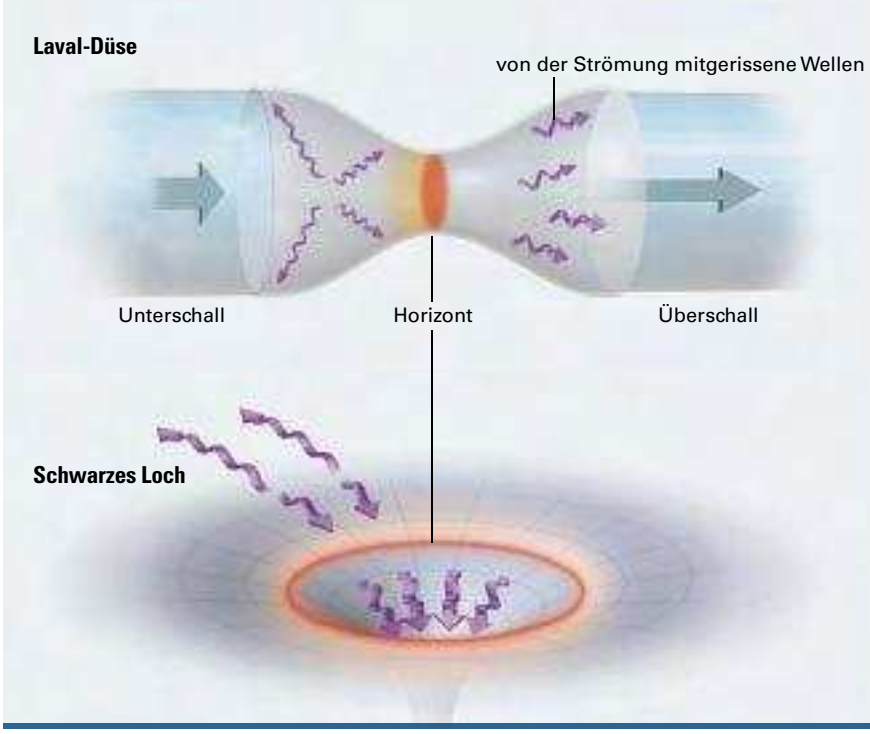
Bislang ist es Experimentalphysikern nicht gelungen, irgendeine dieser Ideen zur Messung der Hawking-Strahlung im Labor umzusetzen, und so versuchen die Theoretiker zunächst, mit der mathematischen Beschreibung der Probleme voranzukommen. Wie die molekulare Struktur der Flüssigkeit die Ausbreitung der Phononen beeinflusst, ist sehr kompliziert.

Einem von uns (Jacobson) ist es gelungen, dieses Problem zu vereinfachen. In Bezug auf die Ausbreitung von Wellen werden die wichtigsten Eigenschaften der molekularen »Körnigkeit« der Flüssigkeit von der Dispersionsrelation beschrieben. Diese gibt den Zusammenhang zwischen Frequenz, Wellenlänge und Geschwindigkeit einer Schallwelle an. Während sich die Geschwindigkeiten von recht langwelligen Schallwellen mit unterschiedlichen Wellenlängen nur geringfügig voneinander unterscheiden, kann sie bei kürzeren Wellenlängen, die ungefähr dem Abstand zwischen den Molekülen entsprechen, durchaus davon abhängen.

Wir unterscheiden zwischen drei Formen dieser so genannten Dispersion. Beim Typ I verhalten sich kurze Wellen genauso wie lange Wellen. Beim Typ II verringert sich die Geschwindigkeit, wenn die Wellenlänge abnimmt, während sie beim Typ III ansteigt. Für alle dieser Formen gibt es Beispiele. Typ I beschreibt Photonen in der Relativitätstheorie, Typ II Phononen in suprafluidem Helium und Typ III gilt für Phononen in einem verdünnten Bose-Einstein-Kondensat. Diese Unterteilung liefert ein Schema, mit dem man studieren kann, wie die molekulare »Körnig- ▷

Modell eines Schwarzen Lochs

Eine so genannte Laval-Düse, die in Raketenmotoren verwendet wird, ähnelt in gewisser Weise einem Schwarzen Loch. Die Flüssigkeit strömt mit Unterschallgeschwindigkeit in die Düse hinein. Die Verengung bewirkt die Beschleunigung der Flüssigkeit bis auf Schallgeschwindigkeit. Die ausströmende Flüssigkeit bewegt sich schneller als der Schall. Im Unterschallbereich können sich Schallwellen entgegen der Strömungsrichtung ausbreiten, im Überschallbereich jedoch nicht. Die Verengung der Düse wirkt daher wie der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs: Schall kann in die Überschallregion eindringen, sie aber nicht verlassen. In diesem Bereich könnten Quantenfluktuationen Schall entstehen lassen, welcher der Hawking-Strahlung ähnelt.



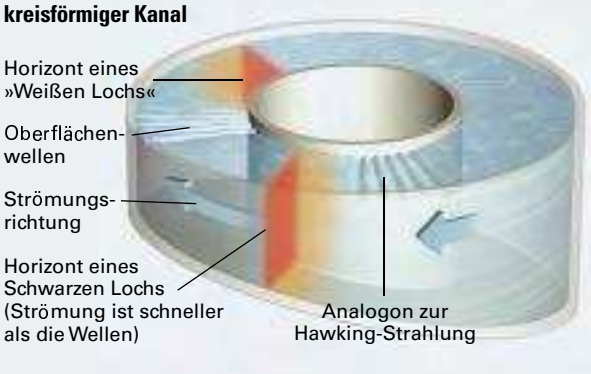
Schwarze Löcher im Selbstbau

Die Laval-Düse ist nicht das einzige Modell eines Ereignishorizonts, das im Labor realisiert werden könnte. Seit mehreren Jahren denke ich gemeinsam mit meinem Kollegen William Unruh von der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada) über weitere mögliche Versuchsanordnungen nach.

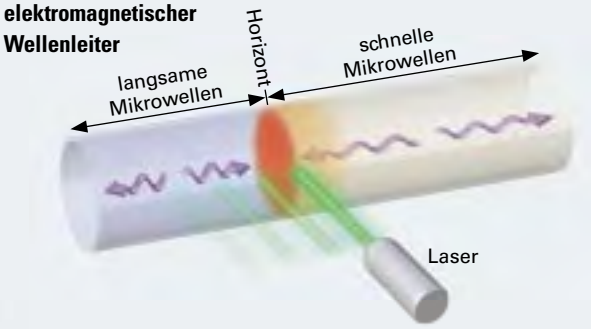
Oberflächenwellen auf einer Flüssigkeit in einem kreisförmigen Kanal (wie im Bild gezeigt) bieten eine interessante Alternative zur Laval-Düse. Als Modell eines Schwarzen Lochs eignet sich diese Anordnung, wenn die Wellenlänge wesentlich größer ist als die Tiefe der Flüssigkeit (das Bild ist nicht maßstabsgerecht). Wo der Kanal enger oder flacher wird, nimmt die Strömungsgeschwindigkeit zu und kann an einem bestimmten Punkt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen übersteigen. Dieser Punkt entspricht dem Horizont eines Schwarzen Lochs. Wirft man hinter dem Horizont einen Stein in die Flüssigkeit und erzeugt dadurch Wellen, so können diese nicht auf die andere Seite des Horizonts gelangen, denn dafür sind sie zu langsam. Statt Licht oder Schallwellen würden durch den Hawking-Effekt in dieser Versuchsanordnung Oberflächenwellen erzeugt, die sich entgegen der Strömungsrichtung ausbreiten. Die Energie dieser Wellen ist so niedrig, dass dieser Effekt nur bei extrem kalten Flüssigkeiten wie etwa supraflüssigem Helium nachweisbar sein könnte. Außer diesem Analogon zum Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs gibt es im kreisförmigen Kanal einen Punkt, an dem die Strömungsgeschwindigkeit so weit abnimmt, dass sie unter die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen absinkt. Dieser Punkt entspricht dem Horizont eines Weißen Lochs, aus dem alle Strahlung entkommen, in das Strahlung aber nicht hineingelangen kann.

Mit heutiger Technologie lassen sich elektromagnetische Signale besser verstärken und deshalb einfacher messen als Schallwellen oder Oberflächenwellen mit vergleichbarer Energie. Das brachte uns auf die Idee, die Ausbreitung von Mikrowellen in einem langen und dünnen Wellenleiter als Modell eines Ereignishorizonts zu betrachten. Mit Hilfe eines Laserstrahls kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Mikrowellen innerhalb des Wellenleiters (im Bild als Stab dargestellt) von außen beeinflusst werden. Bewegt man den Laserstrahl mit einer bestimmten Geschwindigkeit entlang dem Stab (im Bild nach rechts), sodass die Mikrowellen links davon langsamer und rechts davon schneller sind als die Bewegung des Laserstrahls, dann entsteht an dem Punkt, wo der Strahl auf den Wellenleiter trifft, ein Ereignishorizont: Die Mikrowellen können den nach rechts wandernden Punkt nicht überholen und demzufolge nicht von der linken Seite, die der Region innerhalb des Schwarzen Loches entspricht, zur rechten Seite gelangen. Von rechts nach links können die Wellen jedoch den Horizont überqueren. Die dem Hawking-Effekt entsprechende Strahlung tritt in dieser Anordnung als Mikrowellen auf, die nach rechts dem Laser vorauseilen und am Ende des Stabs gemessen werden könnten. Die Temperatur dieser Strahlung könnte Bruchteile eines Kelvins erreichen.

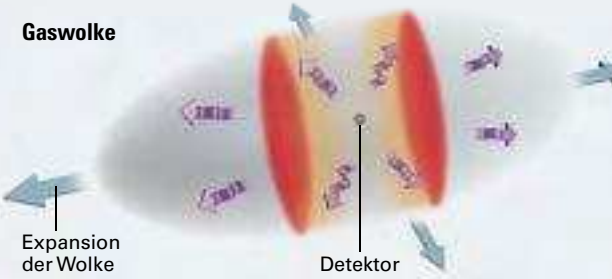
kreisförmiger Kanal



elektromagnetischer Wellenleiter



Gaswolke



Analogien zwischen Laborsystemen und Gravitationsphänomenen sind nicht auf Schwarze Löcher beschränkt. Der Hawking-Strahlung ähnelnde Quanteneffekte waren vermutlich auch während der inflationären Phase von Bedeutung, als sich das junge Universum für kurze Zeit exponentiell ausdehnte. Mit Bose-Einstein-Kondensaten, extrem kalten und daher von Quanteneigenschaften dominierten Gasen, könnte es möglich sein, einige Merkmale dieser Epoche im Labor zu untersuchen. Das Bild links unten zeigt ein expandierendes, zigarrenförmiges Bose-Einstein-Kondensat, das als Modell für ein eindimensionales Universum mit beschleunigter Expansion dient. Petr Fedichew vom Kurchatow-Institut in Moskau und Uwe Fischer von der Universität Innsbruck haben dieses Szenario untersucht. Es ähnelt einem Weißen Loch: Schallwellen außerhalb des Horizonts werden von der Strömung mitgerissen und können nicht das Innere erreichen. Diese Quanteneffekte erzeugen Dichteschwankungen, die möglicherweise einfacher beobachtet werden können.

Ralf Schützhold

Der Autor ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Theoretische Physik der Technischen Universität Dresden und Leiter der Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe »Quantensimulationen«.

keit« der Flüssigkeit den Schall makroskopisch beeinflusst. Seit 1995 untersuchen Unruh und andere Forscher den Hawking-Effekt im Fall von Dispersion des Typs II und III.

Um die Auswirkung der Dispersion auf die Hawking-Phononen zu verstehen, ist es sinnvoll, Letztere in der Zeit zurückzuverfolgen. So betrachtet, spielt die Dispersion für (langwellige) Phononen, die dem Ereignishorizont entkommen sind, zunächst keine Rolle. Mit der Annäherung an den Horizont nimmt ihre Wellenlänge ab. Sobald ihre Wellenlänge ungefähr auf den Molekülabstand geschrumpft ist, entscheidet die Form der Dispersionsrelation über das Schicksal der Phononen. Beim Typ II werden sie zunächst langsamer, kehren dann um und entfernen sich entgegen der Strömungsrichtung vom Horizont. Beim Typ III dagegen werden sie beschleunigt, durchbrechen die Schallgeschwindigkeit für lange Wellen und überqueren den Horizont.

Universelle Hawking-Strahlung

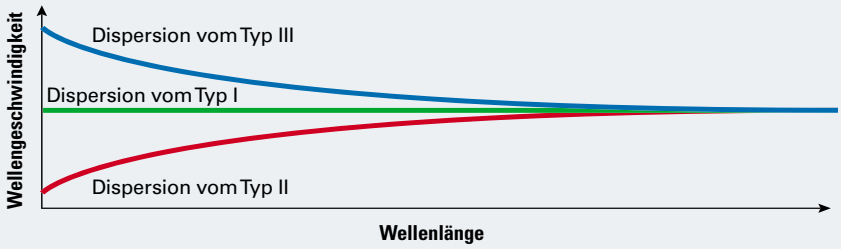
Bei jeder gültigen Schall-Analogie für den Hawking-Effekt müssen die virtuellen Phononenpaare ihre Existenz im Grundzustand beginnen, so wie es bei den Hawking-Photonen um ein Schwarzes Loch der Fall ist. In einer realen Flüssigkeit lässt sich diese Bedingung leicht erfüllen. Ändert sich die Strömung der makroskopischen Flüssigkeit im Vergleich zum Ablauf der Ereignisse auf der molekularen Ebene räumlich und zeitlich nur langsam, so bleibt die Energie des Gesamtsystems minimal. Aus welchen Molekülen die Flüssigkeit im Einzelnen besteht, spielt dabei keine Rolle. Ist diese Bedingung erfüllt, so kann die Flüssigkeit bei allen drei Formen der Dispersionsrelation Hawking-Strahlung aussenden. Die mikroskopischen Einzelheiten der Flüssigkeit haben keinerlei Einfluss auf die Emission von Phononen. Entgegen der Vorhersage Hawkings ergibt sich im Fall der Dispersion von Typ II und III, dass die Wellenlängen am Horizont nicht beliebig klein werden können. Vielmehr schrumpfen die Wellenlängen nur bis zum Erreichen des Abstands zwischen den Molekülen.

Übertragen auf Schwarze Löcher in der Raumzeit bedeutet dies, dass die seltsame unendliche Rotverschiebung der Hawking-Photonen eine Folge der physikalisch unbegründeten Annahme unendlich kleiner Atome ist. Obwohl Hawkings Theorie also von einer wesentlichen Vereinfachung ausgeht, scheinen ihre Vorhersagen im Grundsatz dennoch richtig zu sein. Einige Forscher glauben sogar, dass sich die unendliche Rotverschiebung der Hawking-Photonen bei Schwarzen Löchern durch die Berücksichtigung der Dispersion kurzwelligen Lichts vermeiden ließe.

Doch die Sache hat einen Haken. Der Relativitätstheorie zufolge kann Licht im Vakuum keine Dispersion aufweisen, weil die beobachtete Wellenlänge eines Photons nur von der Relativbewegung des Beobachters abhängt. Einem Beobachter, der dem Licht mit hoher Geschwindigkeit folgt, kann dessen Wellenlänge beliebig groß erscheinen. Deshalb gibt es keine einheitliche Grenzwellenlänge, bei der sich die Dispersionsrelation für Photonen vom Typ I zum Typ II oder III ändert. Verschiedene Beobachter würden diese Grenze bei unterschiedlichen Wellenlängen sehen.

Hawking hatte zwar Recht, aber ...

Die Flüssigkeitsanalogie ist ein Ansatz, um Hawkings Theorie zu korrigieren. In einer idealen Flüssigkeit hängt die Schallgeschwindigkeit nicht von der Wellenlänge ab (Dispersion von Typ I). In einer realen Flüssigkeit sinkt die Schallgeschwindigkeit (Typ II) oder steigt an (Typ III), wenn die Wellenlänge sich dem Abstand zwischen den Molekülen nähert.



Hawkings Analyse basiert auf der Relativitätstheorie, in der die Lichtgeschwindigkeit konstant ist. Dies entspricht der Dispersion von Typ I. Wenn die Lichtgeschwindigkeit variabel wäre, würden sich die Wege der Photonen der Hawking-Strahlung ändern.

Liegt eine Dispersion von Typ II vor, so entstehen die Photonen außerhalb des Horizonts und fallen nach innen. Bei einem der Photonen ändert sich die Geschwindigkeit so, dass es seine Bewegungsrichtung umkehrt und nach außen entkommt.

Gilt die Dispersion von Typ III, dann entstehen die Photonen innerhalb des Horizonts. Eines der Photonen wird über die normale Lichtgeschwindigkeit hinaus beschleunigt und kann dadurch entkommen.

Da die Photonen nicht genau am Horizont entstehen, erleiden sie keine unendliche Rotverschiebung. Doch für diese Korrektur an Hawkings Analyse müssen wir einen hohen Preis bezahlen: Die Relativitätstheorie muss modifiziert werden. Im Widerspruch zu Einsteins Annahmen muss sich die Raumzeit wie eine reale Flüssigkeit verhalten und aus einer unbekannten Art von Teilchen aufgebaut sein.

▷ Damit stehen Physiker vor einem Dilemma. Entweder halten sie an Einsteins Vorgabe fest, dass es kein ausgezeichnetes Bezugssystem gibt, und akzeptieren die unendliche Rotverschiebung – oder sie nehmen an, es gäbe keine unendliche Rotverschiebung, und führen ein bevorzugtes Bezugssystem ein. Ob ein solches Bezugssystem grundsätzlich im Widerspruch zur Relativitätstheorie steht, ist unklar. Es könnte ein lokales Phänomen sein, das auf die Umgebung des Ereignishorizonts des Schwarzen Lochs beschränkt ist. In diesem Fall würde die Allgemeine Relativitätstheorie global ihre Gültigkeit behalten. Falls es solche Bezugssysteme jedoch überall gibt, dann kann die Relativitätstheorie nur eine Näherung an eine tiefer gehende Theorie der Natur sein. Zwar haben Experimentalphysiker noch keine Hinweise auf solche Bezugssysteme gefunden, aber das kann an der unzureichenden Genauigkeit bisheriger Experimente liegen.

Manche Physiker vermuten seit Längerem, dass es für die Gültigkeit der Relativitätstheorie bei sehr kleinen Abständen eine Grenze gibt, wo Quanteneffekte relevant sind. Diese Grenze könnte im Bereich der Plancklänge liegen. Die akustische Analogie verstärkt diesen Verdacht. Ihr zufolge muss die Raumzeit eine Art körnige Struktur aufweisen, damit sich die unendliche Rotverschiebung verhindern lässt.

In diesem Sinn hätte die Analogie zwischen Schall und Licht sehr viel weiter reichende Folgen, als William Unruh ursprünglich vermutete. Die Vereinigung von Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantentheorie könnte dazu führen, die Vorstellung einer kontinuierlichen Raumzeit aufzugeben und die Entdeckung von »Atomen« der Raumzeit zu postulieren. Vielleicht hatte Einstein solche Gedanken, als er 1954, im Jahr vor seinem Tod, an Michele Besso schrieb: »Ich halte es durchaus für möglich, dass sich die Physik nicht auf dem Konzept des Feldes aufbauen lässt, also auf kontinuierlichen Strukturen.« Ahnungsvoll schrieb Einstein weiter: »Dann bleibt nichts von meinem ganzen Luftschloss, einschließlich der Theorie der Gravitation, aber auch nichts vom Rest der modernen Physik.«

Bis heute ist das Schloss intakt, doch seine Zukunft ist ungewiss. Die Schwarzen Löcher und ihre akustischen Analogien könnten für sein Schicksal entscheidend sein. ◁

Theodore A. Jacobson (oben) und **Renaud Parentani** beschäftigen sich mit der Theorie der Quantengravitation und ihren beobachtbaren Konsequenzen. Jacobson ist Professor für Physik an der Universität von Maryland. Parentani ist Professor für Physik an der Universität Paris in Orsay und arbeitet am Labor für Theoretische Physik des französischen Nationalen Wissenschaftlichen Forschungszentrums (CNRS).

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Hawking radiation in an electro-magnetic waveguide? Von R. Schützhold und W. G. Unruh in: Phys. Rev. Lett. 95, 031301, 2005

The universe in a helium droplet. Von G. E. Volovik. Oxford University Press, Oxford 2003

Artificial Black Holes. Von M. Novello, M. Visser, und G. Volovik (Hg.). World Scientific, Singapur 2002

What did we learn from studying acoustic black holes? Von R. Parentani in: International Journal of Modern Physics A, Vol. 17, Nr. 20, S. 2721, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

1956

Luxus-Süßstoff

»Von einem niederländischen Chemieunternehmen wurde dem Handel unter der Markenbezeichnung ›Natriumcyclamat‹ … ein neuer Süßstoff übergeben, der sich Saccharin gegenüber durch einen reineren Geschmack, fehlenden bitteren Nachgeschmack und Unempfindlichkeit beim Mitkochen auszeichnet. Sein Preis ist allerdings höher, seine Süßkraft geringer als die des Saccharins … Der Süßstoff ist in Wasser leichtlöslich, dagegen unlöslich in Alkohol. Trotz des höheren Preises dürften an ihm alle diejenigen interessiert sein, die an Qualität der gesüßten Speisen hohe Ansprüche stellen …« *Orion, Nr. 13/14, S. 581, April 1956*

Der kleine Unterschied im Blut

»Der Blutforscher W. M. Davidson hat ein Verfahren entdeckt, mit dem es möglich ist, das Geschlecht aus dem mikroskopischen Blutbilde zu erkennen. Die Methode, die sowohl beim Menschen als auch bei Säugetieren anwendbar ist, basiert auf der Tatsache, daß bestimmte kernhaltige weiße Blutkörperchen charakteristische Kernanhangsgebilde aufweisen, die ausschließlich im weiblichen Geschlecht auftreten. Sie messen etwa 1,5 Mikrometer im Durchmesser und werden nach ihrer Form als ›Trommelschlegel‹ bezeichnet. Dem neuen Verfahren … kommt praktische Bedeutung besonders für die Diagnostik und Differenzierung des Scheinzwittertums zu.« *Kosmos, 52. Jg., Nr. 4, S. 5, April 1956*

»UNIVAC« konnte 12000 Zahlen oder Buchstaben gleichzeitig speichern.

Mechanisches Riesenhirn

»Zum allgemeinen Gebrauch für Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung wird im Frühjahr 1956 in Frankfurt ein großes Rechenzentrum eingerichtet: Die erste Anlage dieser Art in Europa. … Das Gerät, den Fachleuten als »UNIVAC« bekannt, … wird im Battelle-Institut aufgestellt. Die Geschwindigkeit, mit der die Maschine rechnet, ist schwer vorstellbar. Sie löst ihre Aufgaben in Bruchteilen von Sekunden. … »UNIVAC« kann unter anderem eingesetzt werden in allen Zweigen des Rechnungswesens, der Lohn- und Materialabrechnung, aber auch bei der Wettervorhersage und allen anderen technisch-wissenschaftlichen Problemen. Fehler sind dabei ausgeschlossen.« *Industriekurier, Wochenausgabe Technik und Forschung, 9. Jg., Nr. 63 (15), S. 190, April 1956*

1906

Telefon als Hörgerät

»Der Erfinder dieses neuen Apparates für Schwerhörige ist von der bekannten Tatsache ausgegangen, dass Schwerhörige Gespräche durch das Telefon weit besser verstehen als das frei gesprochene Wort. Der Apparat ist ein transportabler, bequem in der Tasche unterzubringender, elektrischer Sprechapparat … Er besteht aus einem sehr empfindlichen Mikrophon und Telephon, spricht infolgedessen sehr laut und ist für jeden Schwerhörigen ein Mittel, sich wieder mit jedermann unterhalten zu können. Ein Spezialarzt für Ohrenleiden, welcher den Akustikapparat geprüft hat, empfiehlt diesen Apparat Schwerhörigen aufs wärmste.« *Deutsche Export-Revue, 6. Jg., Nr. 2, S. 49, April 1906*

▲ Diese Mischung aus Mikrofon und Telefon ist ein Hörgerät.

Praktisches Alu

»Aluminiumpapier, das neuerdings an Stelle des Stanniols zur Haltbarmachung von Nahrungsmitteln empfohlen wird und diesem als weit billiger gegenübersteht, wird … für das Stanniol ein starker Nebenbuhler sein, wenn es sich in der Benützung als haltbar erweist. Bedingung ist, daß es nicht brüchig wird und sich den Flächen der einzupackenden Gegenstände genau anschmiegt. … Das Aluminium wird in zwei verschiedenen Arten in den Handel gebracht, einmal als mit Aluminium überzogenes Papier, dann als feingewalztes Aluminium, sogenanntes Blattaluminium.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 78, S. 23, April 1906*

Koksen im Kreißsaal

»Als Koller seinerzeit das Kokain in die Augenheilkunde einführte, … wurde die Wunderkraft des Kokains allgemein angestaunt. Seither hat das Kokain in der gesamten übrigen Medizin Anwendung gefunden. In letzter Zeit wurden … Versuche gemacht, durch Kokainisierung der Nase die Geburten schmerzlos zu machen. … Nach Kokainisierung bestimmter Punkte in der Nase verlief die Geburt in zahlreichen Fällen vollkommen schmerzlos, in anderen wesentlich schmerzloser als sonst ohne Kokain. Das Verfahren hat auch sonst keine Nachteile und dürfte wohl bald allgemein versucht werden.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 99, S. 191, April 1906*

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Wie Kinder in Symbolen denken lernen

Der Zusammenhang zwischen einem Ding, das auf ein Ding verweist, und diesem anderen Ding ist für einen Zweieinhalbjährigen alles andere als offensichtlich.

Von Judy S. DeLoache

Vor etwa 20 Jahren erlebte ich einen jener unvergesslichen Momente, in denen ein Forscherleben eine unerwartete, aber produktive Wendung nimmt.

Eigentlich ging es um das Gedächtnis von Kleinkindern. Für ein neues Experiment mit Zweieinhalb- und Dreijährigen hatte ich einen Laborraum als – etwas schäbiges – Wohnzimmer eingerichtet, mit Sofa, Sessel, Wohnzimmerschrank und Zubehör, und dasselbe Zimmer in verkleinertem Maßstab nachgebaut. Die Möbel der »Puppenstube« entsprachen in allen Einzelheiten – Form, Material, Bezugsstoff und räumlicher Anordnung – den Originalen.

Das Experiment lief so ab: Vor den Augen des Kindes versteckten wir einen Stoffhund namens Klein-Snoopy in dem Miniaturraum, den wir als Klein-Snoopys Zimmer bezeichneten. Dann forderten wir unseren kleinen Probanden auf, den großen Snoopy – eine große Ausgabe der Spielfigur – zu suchen. Dazu gaben wir noch den Hinweis: »Er versteckt sich in seinem großen Zimmer an derselben Stelle.« Uns interessierte, ob sich die Kinder das Modell mit der kleinen Figur darin einprägen und deren Gegenstück in dem großen Zimmer aus dem Gedächtnis aufspüren könnten.

Die Dreijährigen lösten die Aufgabe erwartungsgemäß mit Bravur. Nachdem sie zugesehen hatten, wie die kleine Spielfigur hinter dem Minisofa versteckt worden war, rannten sie schnurstracks ins große Zimmer und holten den großen Hund hinter dem echten Sofa hervor. Die Zweieinhalbjährigen jedoch erwiesen sich – sehr zu meiner wie auch ihrer Eltern Überraschung – als Versager auf der ganzen Linie. Frohgemut liefen sie in das Zimmer, um den großen Snoopy zu holen, doch die meisten von ihnen hatten ersichtlich keine Ahnung, wo sie nach ihm suchen sollten. Dennoch erinnerten sie sich genau, an welcher Stelle der Puppenstube Klein-Snoopy versteckt war, denn dort vermochten sie ihn mit Leichtigkeit zu finden (Bild S. 57).

Also mangelte es ihnen nicht an Gedächtnisleistung. Vielmehr waren sie nicht im Stande, ihr Wissen über das kleine Zimmer auf das große zu übertragen und daraus eine Schlussfolgerung zu ziehen. Demnach war ihnen der Zusammenhang zwischen dem Modell eines Gegenstands und diesem Gegenstand selbst nicht gegenwärtig. Bald ging mir auf, dass mein Experiment etwas ganz anderes untersuchte, als ich eigentlich geplant hatte, nämlich das Symbolverständnis und dessen Erwerb bei Kleinkindern.

Ich verwende das Wort »Symbol«, wie in der Kognitionswissenschaft üblich, in einem sehr weiten Sinn, nämlich als – mehr oder weniger abstraktes – Ding, das stellvertretend für ein anderes Ding steht und insofern auf dieses verweist. Der Buchstabe *x*, der eine unbekannte Zahl bezeichnet, ist ebenso ein Symbol wie das Wort »Baum« für einen echten Baum, eine Fotografie, die auf den abgebildeten Gegenstand verweist, das Kreuz, das je nach Kontext den Sonntag, den Tod oder den christlichen Glauben symbolisiert, oder eben ein handgreifliches Ding wie Klein-Snoopys Zimmer, das als Stellvertreter für das echte Zimmer dient.

Säuglinge beim Anblick von Bildern verwirrt

Zu den bedeutendsten Eigenschaften, die uns Menschen von anderen Lebewesen unterscheiden, zählt die Leichtigkeit, mit der wir symbolische Darstellungen erfinden und verwenden. Dank dieser Fähigkeit vermögen wir Informationen von einer Generation an die nächste weiterzugeben, was die Kultur ausmacht, und können ungeheuer viel in Erfahrung bringen, ohne es unmittelbar erleben zu müssen. Wir alle wissen etwas über Dinosaurier, ohne je einen mit eigenen Augen gesehen zu haben. Symbole spielen eine derart grundlegende Rolle in unserem Leben, dass in der menschlichen Entwicklung vielleicht nichts bedeutsamer ist als der Erwerb der Fähigkeit, symbolisch zu denken.

Unsere Einsicht aus der unerwarteten Zufallsbeobachtung beim Puppenstubenexperiment gab meinem Forschungsinteresse eine neue Richtung. Wann begreifen Kleinkinder die Funktion von Symbolen, und wie gehen sie da-

mit um? Wann und wie lernen sie die im modernen Leben so allgegenwärtigen symbolischen Objekte zu beherrschen?

Die erste Art von Symbolen, mit denen Säuglinge und Kleinkinder konfrontiert werden, sind bildliche Darstellungen. Unsereinem scheinen sie die einfachste Sache der Welt zu sein; aber wie meine Kollegen und ich herausfanden, stürzen sie einen Säugling zunächst in Verwirrung. Das liegt letztlich am Doppelcharakter jedes symbolischen Dings: Es ist realer Gegenstand und zugleich Repräsentant für etwas anderes. Um es also richtig zu verstehen, muss sein Betrachter im Kopf eine doppelte Repräsentation bilden, das heißt, sich sowohl das Ding als solches wie auch die Beziehung zwischen ihm und dem symbolisierten Gegenstand vorstellen.

Unser erster Beleg dafür, dass genau das den ganz kleinen Kindern schwer fällt, waren beiläufige Beobachtungen. Immer wieder bekam ich zu hören, dass ein Baby zum Beispiel in einem Experiment nach dem Abbild eines Apfels gegriffen oder versucht hatte, seinen Fuß in das Foto eines Schuhs zu stecken. Gemeinsam mit meinen Kollegen David Uttal von der Northwestern University in Evanston (Illinois), Sophia Pierroutsakos vom Community College in St. Louis (Missouri) sowie Karl Rosengren von der Universität von Illinois in Urbana-Champaign beschloss ich, diese Verhaltensweisen genauer unter die Lupe zu nehmen. Wir gingen davon aus, dass sie ▷

ALLE FOTOS DIESES ARTIKELS: RANDY HARRIS

Ein Bild von einem Schuh ist einerseits ein Gegenstand für sich, andererseits eine Darstellung von etwas anderem, nämlich einem Schuh. Diese doppelte Identität macht kleinen Kindern noch sehr zu schaffen, so wie diesem Jungen, der sich das Bild vom Schuh anzuziehen versucht.

IN KÜRZE

▶ **Denken in Symbolen** – Dingen, die auf andere Dinge verweisen – ist zwar eine der kennzeichnenden Eigenschaften des Menschen; gleichwohl müssen es Kinder erst in einem mehrjährigen Prozess erlernen.

▶ Währenddessen begehen sie viele **aufschlussreiche Fehler.** Insbesondere behandeln sie das Foto eines Gegenstands wie diesen Gegenstand selbst und verwechseln ein verkleinertes Modell mit seinem normal großen Vorbild.

▶ Erst wenn das Kind die **doppelte Repräsentation** beherrscht, das heißt ein Ding sowohl als solches wie auch als symbolische Darstellung eines anderen Dings zu betrachten vermag, fängt es an, symbolisch zu denken.

▷ selten und daher schwierig zu beobachten seien. Welch ein Irrtum!

Unser erster Test war ganz einfach: Wir legten neun Monate alten Kindern ein Bilderbuch mit überaus realistischen Farbfotos von einzelnen Gegenständen vor. Zu unserer Überraschung streckten ausnahmslos alle teilnehmenden Kinder – und auch die meisten in den folgenden Untersuchungen – die Hand nach dem jeweiligen Bild aus und befühlten es, rieben, patschten oder kratzten darauf herum. Zuweilen griffen die Kinder sogar zu, als wollten sie die abgebildeten Dinge aus dem Papier ziehen.

Überdies scheint dieses Verhalten universell zu sein, wie wir dank einer günstigen Gelegenheit unter Beweis stellen konnten. Als unsere Kollegin, die Anthropologin Alma Gottlieb, in ein abgelegenes Dorf im westafrikanischen Staat Elfenbeinküste reiste, nahm sie einige unserer Bilderbücher sowie eine Videokamera mit. Die Tests fanden nicht in der kontrollierten Umgebung eines Labors statt; vielmehr saßen die Babys vom Volk der Beng auf der Erde oder auf Mutters Schoß; Hühner und Ziegen liefen umher; in nächster Nähe spielten, arbeiteten, sprachen und lachten andere Kinder und Dorfbewohner. Diese Kinder hatten mit Sicherheit noch nie zuvor ein Bilderbuch zu Gesicht bekommen. Dennoch befühlten sie die abgebildeten Gegenstände genau so wie ihre amerikanischen Altersgenossen.

Diese Verwechslung liegt nicht etwa daran, dass die Kinder den Unterschied zwischen einem Gegenstand und seinem Bild nicht wahrnehmen könnten. Haben sie die Wahl zwischen beidem, entscheiden sie sich für das Echte. Sie erfassen jedoch noch nicht ganz, was ein Bild eigentlich ist und wie es sich von dem abgebildeten Gegenstand unterscheidet. Deshalb erkunden sie es, versuchen sogar, sich beispielsweise den Sauger eines abgebildeten Fläschchens in den Mund zu stecken – allerdings nur bei sehr realistischen Bildern wie etwa Farbfotos.

Ähnliche Verwechslungen kommen auch bei bewegten Bildern vor, wie Pierroutsakos und ihre Kollegin Georgene Troseth von der Vanderbilt-Universität in Nashville (Tennessee) feststellten. Neun Monate alte Kinder griffen nach realistisch dargestellten Gegenständen, die sich auf einem Fernsehbildschirm bewegen, und versuchten sie zu berühren. Dieses Explorationsverhalten lässt stark nach, wenn anstelle der naturgetreuen Darstellungen beispielsweise nur Strichzeichnungen über den Bildschirm wandern.

Erster Schluss vom Bild auf das Abgebildete

Mit 18 Monaten haben Babys meist begriffen, dass ein Bild einen realen Gegenstand lediglich darstellt. Statt nach dem Papier zu greifen, zeigen sie nun auf das Bild und benennen den abgebildeten Gegenstand oder fragen nach dessen Namen. Melissa Preissler von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) und Susan Carey von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) erbrachten dafür vor Kurzem einen sehr anschaulichen Nachweis. Sie zeigten ihren 18 und 24 Monate alten Probanden eine einfache Strichzeichnung von einem Schneebesen und brachten ihnen damit das Wort für diesen den Kindern bislang unbekannten Gegenstand bei. Für die meisten von ihnen war es offenbar selbstverständlich, dass sich das Wort auf den Gegenstand und nicht auf dessen Abbild bezog. Die Kinder deuteten also das Bild symbolisch: Ihnen war klar, dass es auf seinen Gegenstand verweist und ihm nicht nur ähnlich ist.

Dass sie nicht mehr mit den Händen nach dem Papier greifen, hängt unserer Ansicht nach auch damit zusammen, dass sich zunehmend die inhibitorische Kontrolle, die Fähigkeit, Impulse zu zügeln, ausbildet. Dieser allgemeinen Entwicklung liegen Veränderungen im Stirnhirn, dem frontalen Cortex, zu Grunde. Dadurch werden die Kinder fähig, Bilder nach Erwachsenenart einfach nur zu betrachten, ohne gleich aktiv zu werden.

Auch die Erfahrung muss in diesem Entwicklungsprozess eine Rolle spielen. In einer so bilderreichen Gesellschaft wie der unseren bekommen die meisten Kinder tagtäglich Familienfotos und Bilderbücher zu Gesicht. Dadurch lernen sie, dass und inwiefern Bilder etwas anderes sind als Gegenstände: Man betrachtet sie und spricht darüber, aber man macht nichts mit ihnen.

Dennoch dauert es mehrere Jahre, bis die Kleinen das in vollem Umfang begreifen. Dies belegen Untersuchungen von John H. Flavell und seinen Mitarbeitern an der Universität Stanford (Kalifornien). Viele Vierjährige, denen man das Bild einer Schüssel Popcorn vorlegt, glauben noch, dass die abgebildeten Maiskrümel herausfallen, wenn man die Abbildung auf den Kopf dreht.

Die Verwechslung von Symbol und Gegenstand beschränkt sich nicht auf Bilder. Seit vielen Jahren beobachten meine Mitarbeiter, meine Studenten und ich immer wieder, wie Kinder ins Labor kommen und sich alsbald auf das Stühlchen aus unserer Experimentalpuppenstube setzen wollen – sehr zum Erstaunen aller Anwesenden. Uttal und Rosengren beobachteten zudem, wie ihre eigenen Töchter sich in ein Puppenbett zu legen oder in ein Spielzeugauto zu zwängen versuchten. Da diese bemerkenswerten Verhaltensweisen in der wissenschaftlichen Literatur nicht zu finden waren, beschlossen wir, sie eingehender zu untersuchen.

Dazu brachten wir Kinder im Alter zwischen 18 und 30 Monaten einzeln in einen Raum, der drei auf ihre Größe zugeschnittene Spielgeräte enthielt: eine Rutsche, einen Kinderstuhl und ein Spielauto, in das sie sich hineinsetzen und das sie mit den Füßen vorwärts stoßen konnten. Hatte das Kind mindestens zweimal mit jedem der Gegenstände gespielt, wurde es aus dem Raum geführt. Dann ersetzten wir diese Dinge durch verkleinerte, aber ansonsten gleiche Modelle und ließen das Kind spontan spielen, ohne den Austausch zu er-

wähnen. Schenkte es den Miniaturspielzeugen mehr als drei bis vier Minuten lang keine Beachtung, lenkten wir schließlich seine Aufmerksamkeit darauf. All dies hielten wir auf Video fest.

Bei der Auswertung durchmusterten wir das Filmmaterial auf spezielle Fehlleistungen, die wir »Größenfehler« *(scale errors)* nannten. Gemeint ist der ernsthafte Versuch, eine Handlung zu vollführen, die auf Grund extremer Unterschiede zwischen der Körpergröße des Kindes und der Größe des Zielobjekts eindeutig unmöglich ist. Wir werteten ein Verhalten erst dann als Größenfehler, wenn zwei oder drei Beurteiler der Videoaufzeichnungen es unabhängig voneinander als solchen einstuften.

Gulliver-Missgeschicke

Selbst unter diesen restriktiven Kriterien waren bei fast der Hälfte der Kinder einer oder mehrere dieser Fehler zu verzeichnen (Bild S. 58). Die Kleinen bemühten sich offensichtlich allen Ernstes, mit den Spielsachen im Liliputformat dasselbe anzustellen wie zuvor mit den großen. Manche liefen zum Puppenstühlchen, stellten sich davor und ließen sich langsam und vorsichtig darauf nieder, andere thronten auf der Lehne, wieder andere setzten sich so schwungvoll, dass das Stühlchen umfiel. Bei dem Versuch, die Miniaturrutsche zu benutzen, fielen die Kinder in der Regel herunter; andere wollten die Leiter zur Rutsche hochklettern, mit dem Effekt, dass das ganze Ding hintenüberkippte. (Da Stühlchen und Rutsche aus stabilem Kunststoff bestanden und nur etwa zwölf Zentimeter hoch waren, bestand keine Verletzungsgefahr.) Ein paar Kinder versuchten, sich in das Miniaturauto zu setzen, öffneten genau wie bei der größeren Ausgabe die Tür und mühten sich – oft mit bemerkenswerter Beharrlichkeit –, wenigstens einen Fuß hineinzuzwängen. Ein kleines Mädchen zog sogar seinen Schuh aus, allem Anschein nach in der Hoffnung, dass es seinen Fuß dann hineinbringen würde.

Erstaunlicherweise schienen die Kindern von ihren Fehlschlägen kaum beeindruckt. Zwei von ihnen ließen ein wenig Unmut erkennen, einige schauten etwas belämmert drein, doch die meisten machten einfach etwas anderes. Wahrscheinlich liegt dieser Gleichmut daran, dass der Alltag eines Kleinkinds ohnehin voller Misserfolgserlebnisse steckt.

Den Ursprung von Größenfehlern vermuten wir im noch unreifen Zusammenspiel zwischen zwei Gehirnarealen, die beide visuelle Information verarbeiten. Das eine ist für das Erkennen eines Gegenstands zuständig (»das ist eine Rutsche«), das andere für die Ausführung einer Handlung (»ich werde hinunterrutschen«). Erblickt ein Kind die Miniaturausgabe eines vertrauten Gegenstands, so aktiviert diese visuelle Information – Form, Farbe, Oberflächenstruktur und so weiter – in seinem Kopf die Repräsentation des echten Vorbilds (»Rutsche«). Mit diesem Gedächtnisinhalt assoziiert ist ein bestimmtes motorisches Programm für die übliche Interaktion mit Gegenständen dieser Art (»auf einer Rutsche kann man hinunterrutschen«). Weil in dieser Kette neuronaler Aktivität die Information über die Größe des Gegenstands verloren geht, kommt das Kind auf die Idee, auf der Miniaturrutsche zu rutschen.

Bei den rund 50 Prozent der Kinder, die keine Größenfehler machten, wurde vermutlich das entsprechende motorische Programm aktiviert, gleich danach jedoch neuronal gehemmt, weil die Größeninformation eben doch ins Spiel kam. Diejenigen, die tatsächlich versuchten, mit den Puppengeräten zu spielen, waren jedoch keineswegs unfähig, die Größe eines Gegenstands mit den Augen richtig einzuschätzen – im Gegenteil. ▷

Klein-Snoopys Zimmer ist für einen Zweieinhalbjährigen etwas ganz anderes als das gleiche Zimmer im Normalmaßstab. Dass Klein-Snoopy hinter der Miniaturtopfpflanze sitzt, ist für den Jungen kein Anlass, den großen Snoopy hinter der echten Pflanze zu suchen.

Dass dieser Stuhl zum Sitzen viel zu klein ist (im Experiment so klein wie eine Postkarte), kann das Kind zwar sehen, unterdrückt aber trotzdem die zugehörige Handlung nicht, weil die beiden Stellen in seinem Gehirn, die visuelle Eindrücke verarbeiten, noch nicht ausreichend miteinander kommunizieren.

▷ Manche Kinder bückten sich beispielsweise vor dem Miniaturstuhl und schauten zwischen ihren Beinen hindurch, um sich richtig hinzusetzen. Denjenigen, die sich in das Miniauto zwängen wollten, gelang es, ihren Fuß genau in die winzige Öffnung zu bohren.

Bei ihrer Entscheidung, mit den Puppengeräten genauso zu verfahren wie mit den richtigen, stützten sich die Kinder auf visuelle Informationen, die das kleine Ding mit dem großen verknüpften. Bei der Ausführung ihres Plans dagegen nutzten sie die visuelle Information über die Größe des Modells, um ihre Handlungen zu steuern. Das passt zu einflussreichen Theorien über die visuelle Verarbeitung, wonach für die Objekterkennung und Planung andere Hirnareale zuständig sind als für die Ausführung und Steuerung von Handlungen; beide Areale verarbeiten visuelle Informationen getrennt voneinander. Bei Größenfehlern misslingt offenbar der Abgleich zwischen ihnen.

Größenfehler offenbaren zudem ein Versagen der doppelten Repräsentation: Die Kinder können die Unterscheidung zwischen einem Symbol und dem symbolisierten Gegenstand nicht aufrechterhalten. Wir wissen das, weil die Verwechslung zwischen beiden ausbleibt, wenn man es den Kindern erspart, eine doppelte Repräsentation zu bilden. Diese Entdeckung machte ich 1997 bei einem Experiment, das ich gemeinsam mit Rosengren und Kevin F. Miller von der Universität von Illinois durchführte. Wir erzählten Zweieinhalbjährigen – mit Zustimmung ihrer Eltern natürlich –, wir besäßen einen Apparat, mit dem wir Alltagsgegenstände schrumpfen lassen könnten.

Kinder, wir haben den Liebling geschrumpft

Nach unserer Überzeugung war es ja die doppelte Repräsentation, die den Kleinen zu schaffen machte: War Klein-Snoopys Zimmer nun ein Ding für sich oder ein Symbol für Groß-Snoopys Zimmer? Wenn aber ein Kind glaubt, eine Maschine habe den Raum oder einen Gegenstand darin geschrumpft, dann müsste die Kleinausgabe in seinen Augen immer noch dasselbe Ding sein. Das Kind würde also – ohne jeden Rückgriff auf symbolisches Denken – in der Überzeugung handeln, sein Wissen über die große Ausgabe auch auf die kleine anwenden zu können.

Mit unserer Zaubermaschine verwandelten wir Spielzeuge in Miniaturen ihrer selbst. Auch ein großes Zelt ließen wir schrumpfen. Vor den Augen des Kindes legten wir eine Art Pumucklpuppe mit feuerrotem Haar in das Zelt und richteten die Schrumpfmaschine darauf. Danach verzogen sich Kind und Versuchsleiter in einen anderen Raum, um zu warten, bis die Maschine ihr Werk getan hätte. Bei der Rückkehr fanden sie an Stelle des großen Zelts ein kleines vor. (Bemerkenswert an diesem Versuch ist unter anderem, dass die Kinder die Existenz einer Maschine, die Dinge verkleinern konnte, überhaupt nicht verwunderlich fanden. Es kam ihnen auch nicht merkwürdig vor, dass eine solche Maschine ihr Werk unbeobachtet verrichten musste.)

Die Kinder lieferten eine klare Bestätigung unserer Theorie. Als wir sie aufforderten, nach der Puppe zu suchen, schauten sie auf der Stelle in das kleine Zelt. Da sie das kleine Zelt für das ursprüngliche, nunmehr geschrumpfte hielten, fanden sie die versteckte Puppe problemlos. Anders als bei unserem Experiment mit den Minispielgeräten mussten sie keine doppelte Repräsentation bewerkstelligen: Das kleine Zelt war identisch mit dem großen, weshalb die Puppe da lag, wo sie sein sollte – im Weltbild der Kleinen.

Unsere Ergebnisse zum Symbolverständnis von Kleinkindern sind keineswegs nur von theoretischem Interesse. Eine der praktischen Konsequenzen betrifft die Befragung mutmaßlicher Opfer sexuellen Missbrauchs. Nicht selten handelt es sich um sehr kleine Kinder, die besonders schwierig zu vernehmen sind. Viele Fachleute, darunter Polizeibeamte, Sozialarbeiter, Psychologen und Ärzte, sehen in anatomisch korrekt gestalteten Puppen ein geeignetes Hilfsmittel. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass es einem kleinen Kind leichter fällt zu schildern, was ihm angetan wurde, wenn es das statt an sich selbst an einer Puppe demonstrieren kann. Man muss sich jedoch klar machen, dass hinter dieser Annahme eine weitere steht: dass nämlich ein Kleinkind in der Lage sei, dieses

symbolische Objekt sowohl als Puppe wie auch als Stellvertreter seiner selbst zu begreifen.

Diese Annahme ziehen etliche Forscher in Zweifel, allen voran Maggie Bruck von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland), Steven J. Ceci von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) und Peter Ornstein von der Universität von North Carolina in Chapel Hill. In mehreren unabhängigen Studien befragten diese Forscher Vorschulkinder über ihren jüngst vergangenen Besuch beim Kinderarzt, bei dem eine Untersuchung der Genitalien stattgefunden hatte oder auch nicht. Die Befragung erfolgte teils mit Hilfe anatomisch korrekter Puppen und teils ohne. Im Allgemeinen fielen die Berichte der Kinder korrekter aus, wenn man sie ohne Puppe befragte. Auch neigten die Kleinen eher dazu, fälschlicherweise von einer Berührung ihrer empfindsamen Körperteile zu berichten, wenn eine Puppe zum Einsatz kam.

Das passt zu meinen Forschungsarbeiten, die belegen, dass es Kleinkindern schwer fällt, mit Symbolen richtig umzugehen. Darüber hinaus wurde in meinem Labor auch ein direkter Nachweis dafür erbracht, dass vor allem kleine Kinder gar nicht fähig sind, ihren eigenen Körper korrekt mit einer Puppe in Beziehung zu setzen. Catherine Smith versah irgendeine Stelle am Körper eines Kindes – Schulter oder Fuß beispielsweise – mit einem Aufkleber und forderte es auf, eine kleinere Ausgabe des Aufklebers einer Puppe auf dieselbe Stelle zu setzen. Kinder zwischen drei und dreieinhalb Jahren platzierten den Aufkleber in der Regel richtig, jüngeren jedoch gelang dies nur in weniger als der Hälfte aller Fälle. Selbst unter solch einfachen Bedingungen, die weder das Gedächtnis beanspruchen noch emotional belastend sind, vermögen demnach sehr kleine Kinder ihren eigenen Körper nicht mit dem einer Puppe zu identifizieren.

Diese Erkenntnis erhärtet die generellen Vorbehalte gegen den Einsatz anatomisch korrekter Puppen zu forensischen Zwecken, wenn sehr kleine Kinder betroffen sind. Auf Grund zahlreicher ähnlicher Indizien betrachtet man dieses Verfahren inzwischen bei Kindern unter fünf Jahren kritischer als früher; in mindestens einem amerikanischen Bundesstaat ist es inzwischen sogar verboten.

Die Probleme mit der doppelten Repräsentation haben darüber hinaus Konsequenzen für die pädagogische Praxis. In aller Welt benutzen Vor- und Grundschullehrer Legespiele – Klötzchen, Stäbchen und andere Dinge –, um Kinder in die Welt des Zählens und Rechnens einzuführen. Dahinter steht die Annahme, solche konkreten, greifbaren Gegenstände würden es den Kindern erleichtern, abstrakte mathematische Prinzipien zu begreifen. Wenn die Kinder jedoch gar nicht verstehen, wie diese Dinge mit dem zusammenhängen, was sie darstellen sollen, könnte dieses Verfahren kontraproduktiv sein. In der Tat zeigten einige Forschungsarbeiten, dass es Kindern häufig schwer fällt, solche Legespiele sinnvoll zu nutzen.

Ohne Klötzchen ist Rechnenlernen einfacher

Meredith Amaya von der Northwestern University, Uttal und ich prüfen gegenwärtig, wie sich Erfahrung mit symbolischen Objekten auf das Erlernen von Buchstaben und Zahlen auswirkt. Dazu stellten wir Sechs- und Siebenjährigen Subtraktionsaufgaben, bei denen man Ziffern »borgen« muss – solche Aufgaben machen kleinen Kindern häufig Schwierigkeiten. (Um 42 – 17 zu rechnen, muss man zuerst die Einerziffern subtrahieren. Da aber 2 – 7 »nicht geht«, muss man der Vier in der Zehnerstelle eine Eins wegnehmen, was traditionell »borgen« heißt – auch wenn die Vier die Eins nie wiederkriegt.) Eine Gruppe sollte diese Aufgaben mit Hilfe eines pädagogischen Legespiels lösen lernen, die Kontrollgruppe mit Papier und Bleistift. Beide Gruppen erzielten gleich gute Ergebnisse; die Gruppe mit den Klötzchen brauchte allerdings dreimal so lange für die Lösung. Ein Mädchen aus dieser Gruppe erteilte uns nach dem Test einen Rat: »Bringen Sie das den Kindern doch mal mit Papier und Bleistift bei. Das geht viel einfacher.«

Es gibt noch mehr gut gemeinte Dinge für Kleinkinder, die doppelte Repräsentation erfordern. Sehr beliebt – bei den Erwachsenen – sind etwa Bilderbücher, die nicht nur zum Betrachten einladen, sondern auch etwas zum aktiven Hantieren bieten. Hinter einer Klappe verbirgt sich ein weiteres Bild, mit einem Hebel setzt man Figuren in Bewegung und mehr dergleichen. Meine Doktorandin Cynthia Chiong und ich vermuteten, dass solche buchstäblich mit Händen zu greifenden Zusatzfunktionen des Buchs die Kinder von dessen Informationsgehalt ablenken könnten.

Unseren Verdacht überprüften wir experimentell. Wir brachten 30 Monate alten Kindern Buchstaben mit Hilfe unterschiedlicher Bücher bei. Das eine war ein herkömmliches Leselernbuch der Sorte »A wie Apfel, B wie Baum«; jeder Buchstabe stand einfach, groß und schwarz auf einer Seite, begleitet von einem passenden Bild. Das andere Buch war mit den erwähnten Klappen und Hebeln ausgestattet. Die Kinder der ersten Gruppe erkannten im anschließenden Testdurchgang mehr Buchstaben wieder als die anderen. Vermutlich konnten die Kinder sich besser auf das einfache, »zweidimensionale« Abc-Buch konzentrieren, während die dreidimensionalen Aktivitäten des anderen Buchs die Aufmerksamkeit auf Abwege lenkte. Bei pädagogischen Büchern für Kleinkinder ist also weniger oft mehr.

Erwachsene benutzen Symbole völlig selbstverständlich und ohne darüber nachdenken zu müssen. Säuglinge und Kleinkinder indes haben zu einem ausgereiften Verständnis noch hohe Hürden zu überwinden, wie die aufgeführten Studien belegen. Hinzu kommt, dass heutzutage viele Kinder mit einer wachsenden Vielfalt von Symbolen konfrontiert sind. Ein besseres Verständnis des frühkindlichen Symbolerwerbs dürfte viele Lernschwierigkeiten erkennen und beheben helfen. ◁

Judy S. DeLoache befasst sich mit den Frühstadien der kognitiven Entwicklung, insbesondere der Entwicklung des symbolischen Denkens. Sie ist Professorin für Psychologie an der Universität von Virginia in Charlottesville. Darüber hinaus hat sie seit Ende der 1970er Jahre einen Lehrauftrag für Psychologie an der Universität von Illinois, wo sie auch promovierte.

Entwicklungspsychologie im Kindes- und Jugendalter. Von Robert Siegler, Judy S. DeLoache und Nancy Eisenberg. Elsevier/Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2005

The development of early symbolization: educational implications. Von Judy S. DeLoache, David H. Uttal und Sophia L. Pierroutsakos in: Learning and Instruction, Bd. 8, S. 325, 1998

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

KRAFTSTOFF-EINSPRITZER

Wovon Herr Otto nur träumen konnte

Benzin sparen und Schadstoffe vermeiden, so lautet das Motto der Motorenentwickler.

Von Bernhard Gerl

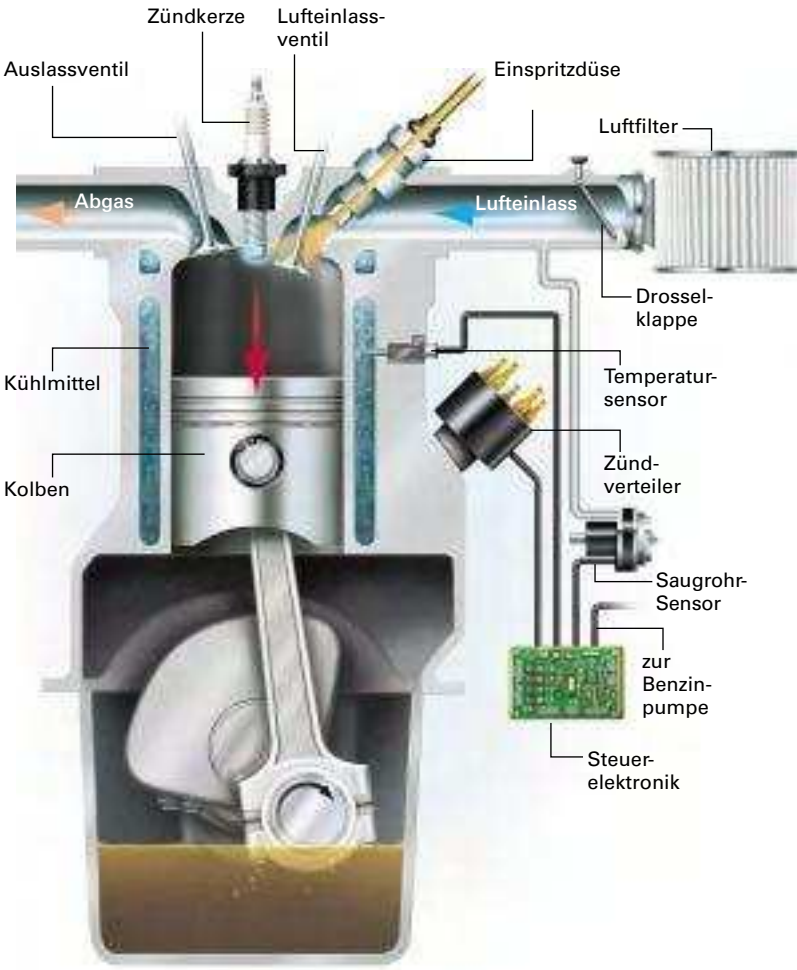
Weil jede Verbrennung Sauerstoff benötigt, muss Benzin mit Luft vermischt werden, bevor es in den Zylindern eines Motors durch einen Funken entzündet werden kann. Dieser Prozess ist von so zentraler Bedeutung, dass immer neue Techniken ersonnen werden, die alle nur das eine Ziel haben: den Kraftstoff optimal zu nutzen, um den Verbrauch zu senken, und die bei ungleichmäßiger Verbrennung entstehenden Schadstoffe zu reduzieren.

Wichtig ist dabei die genaue Steuerung der zugeführten Benzinmenge. Im Idealfall »findet« jedes Kraftstoffmolekül die passende Zahl von Sauerstoffatomen; dazu müsste das Benzin-Luft-Verhältnis 1 zu 14,7 sein. Dieses Gemisch vermochte der von Nicolaus August Otto (1832–1891) erfundene »Vergaser« noch nicht genau zu regeln. Ende der 1970er Jahre kamen deshalb erste Einspritzanlagen auf. Ein elektromagnetisches Ventil sprühte nun Treibstoff in regelmäßigen Zeitabständen in die Ansaugluft, deren Menge per Gaspedal über die Drosselklappe kontrolliert wurde, dann verteilte ein Saugrohr das Gemisch auf die einzelnen Zylinder. Wenige Jahre später kamen die heute gängigen Einzeleinspritzanlagen auf den Markt. Computergesteuerte Düsen liefern dort individuell bemessene Mengen Benzin in die Ansaugluft jedes einzelnen Zylinders – es verbrennt gleichmäßiger und damit steigt sein Wirkungsgrad.

Die beim direkten Konkurrenten des »Ottomotors«, dem Dieselmotor, schon seit einigen Jahren als Common-Rail-Technik bekannte Direkteinspritzung wird neuerdings auch für den Benzinmotor propagiert. Direkteinspritzer zerstäuben den Kraftstoff nicht in die Ansaugluft, sondern in den Zylinder. Die Luft wird über Ventile zugeführt. Damit sich der Kraftstoff im Brennraum gut verteilt, wird er mit bis zu 150 Bar injiziert – ein etwa zehnmal so hoher Druck wie gewöhnlich. Beim Diesel-Direkteinspritzer sind es sogar 2000 Bar. Dazu wird das Benzin von einer Hochdruckpumpe verdichtet und mit dem nötigen Druck in einen Rohrspeicher, das Common Rail, eingespeist. Von dort führen Druckleitungen zu den Einspritzventilen der einzelnen Zylinder.

Der maximale Druck im Brennraum steigt damit auf bis zu 100 Bar. Dieses Verfahren ermöglicht »magere«, das heißt an Kraftstoff ärmere Benzin-zu-Luft-Gemische. Laut dem Stuttgarter Unternehmen Bosch sind 1 zu 20 bis 1 zu 30 möglich. Allerdings ist das Gemisch um die Zündkerze herum »fetter« gehalten, um eine sichere Zündung zu gewährleisten; erst nach außen hin wird es magerer. Insgesamt verringert sich beim Direkteinspritzer der Kraftstoffverbrauch, auf Grund höherer Temperaturen im Brennraum bilden sich aber mehr Stickoxide; dies macht eine Abgasnachbehandlung erforderlich. ◁

Bernhard Gerl arbeitet als Technikautor in Mainz.



Ein Ottomotor mit Einzeleinspritzanlage zerstäubt Benzin in die durch das Saugrohr strömende Luft. Die Mischung gelangt durch das Einlassventil in den Verbrennungsraum. Wird das Gaspedal gedrückt, öffnet sich die Drosselklappe weiter und lässt mehr Luft hinein. Die Steuerelektronik regelt das Mischungsverhältnis und den Zeitpunkt der Zündung.

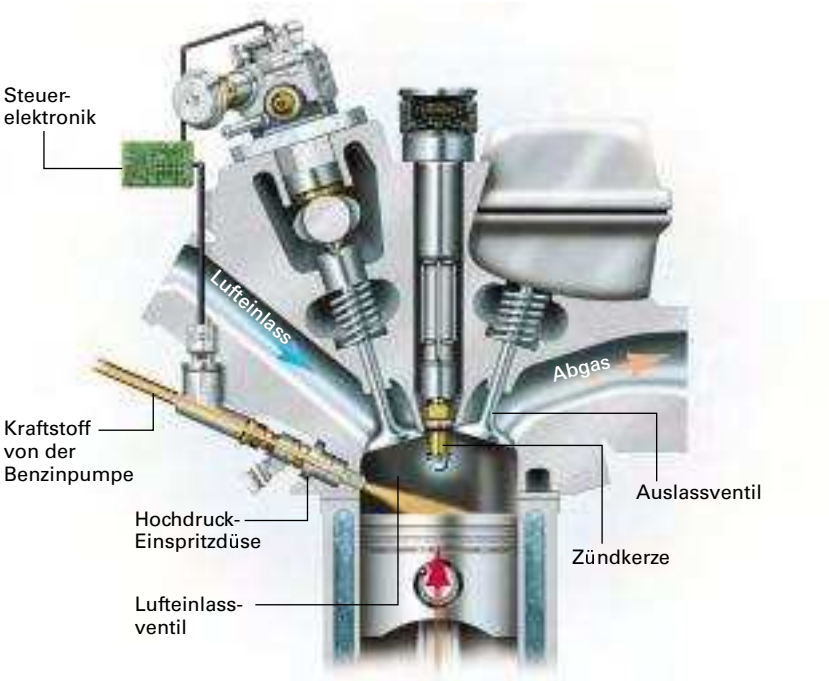
WUSSTEN SIE SCHON?

▶ Der neue Hoffnungsträger im Motorenbau ist die **homogene Magergemischverbrennung (HCCI)**. Dabei werden Benzin und Luft vorgemischt wie in einem Direkteinspritzer, aber wie beim Dieselmotor durch hohen Druck statt mit einer Zündkerze gezündet. Das verwertet den Kraftstoff noch besser und reduziert die Emissionen weiter.

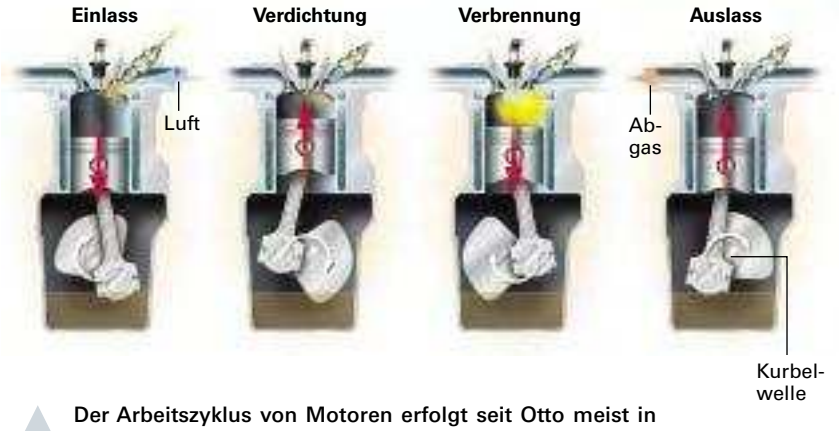
▶ **Dieselmotoren arbeiten effizienter** als Benzinmotoren, insbesondere verdichten die Kolben das Kraftstoffgemisch deutlich stärker (14 zu 1 bis 22 zu 1 gegenüber 8 zu 1 bis 12 zu1). Von Vorteil ist auch der geringere Verbrauch – Diesel enthält pro Liter ungefähr zwölf Prozent mehr Energie als Benzin.

▶ **Die Lambdasonde** misst den Restsauerstoffgehalt im Auspuffgas. Nur bei einem bestimmten Wert kann der Katalysator Schadgase optimal abbauen. Die Steuerelektronik regelt deshalb bei Abweichungen die Zusammensetzung des Kraftstoff-Luft-Gemischs nach.

ILLUSTRATIONEN: PRECISION GRAPHICS / KENT SNODGRASS; NACH: BOSCH, DENSO, HONDA UND SANDIA NAT. LAB.



Motoren mit Direkteinspritzung injizieren den Kraftstoff direkt in den Verbrennungsraum, nachdem sich das Lufteinlassventil geschlossen hat. Um das Benzin fein zu zerstäuben, wird es mit einem Druck bis zu 150 Bar eingespritzt.



Der Arbeitszyklus von Motoren erfolgt seit Otto meist in vier Takten. Jeder Takt umfasst die Bewegung des Kolbens von einem Umkehrpunkt zum anderen. Fährt er nach unten, werden Einlassventile geöffnet; durch den Unterdruck wird das Luft-Benzin-Gemisch in den Zylinder gesaugt (1. Takt). Der aufwärts gehende Kolben verdichtet es bei 400 bis 500 Grad Celsius auf 10 bis 15 Bar (2. Takt). Ein Funken zündet das Gemisch. Die Temperatur steigt dabei auf 2000 bis 2500 Grad Celsius, der Druck auf 40 bis 60 Bar. Dadurch wird der Kolben nach unten gepresst (3. Takt). Nun öffnet sich das Auslassventil und die Abgase werden vom Kolben hinausgeschoben (4. Takt).

In ein Saugrohr eingespritztes Benzin (farbig) trifft auf ein Lufteinlassventil, das sich gerade zu öffnen beginnt (Experiment der Sandia National Laboratories).

SANDIA NAT. LAB. / PETER WITZE

Geburt eines modernen Ökosystems

Einem Zoologen des 21. Jahrhunderts wäre das kambrische Meer recht vertraut vorgekommen: Einzigartige Fossilien aus China zeigen, dass die Tierwelt der Ozeane schon vor 525 Millionen Jahren der heutigen ähnelte, mit ökologisch komplexen Beziehungen.

Von Jean Vannier

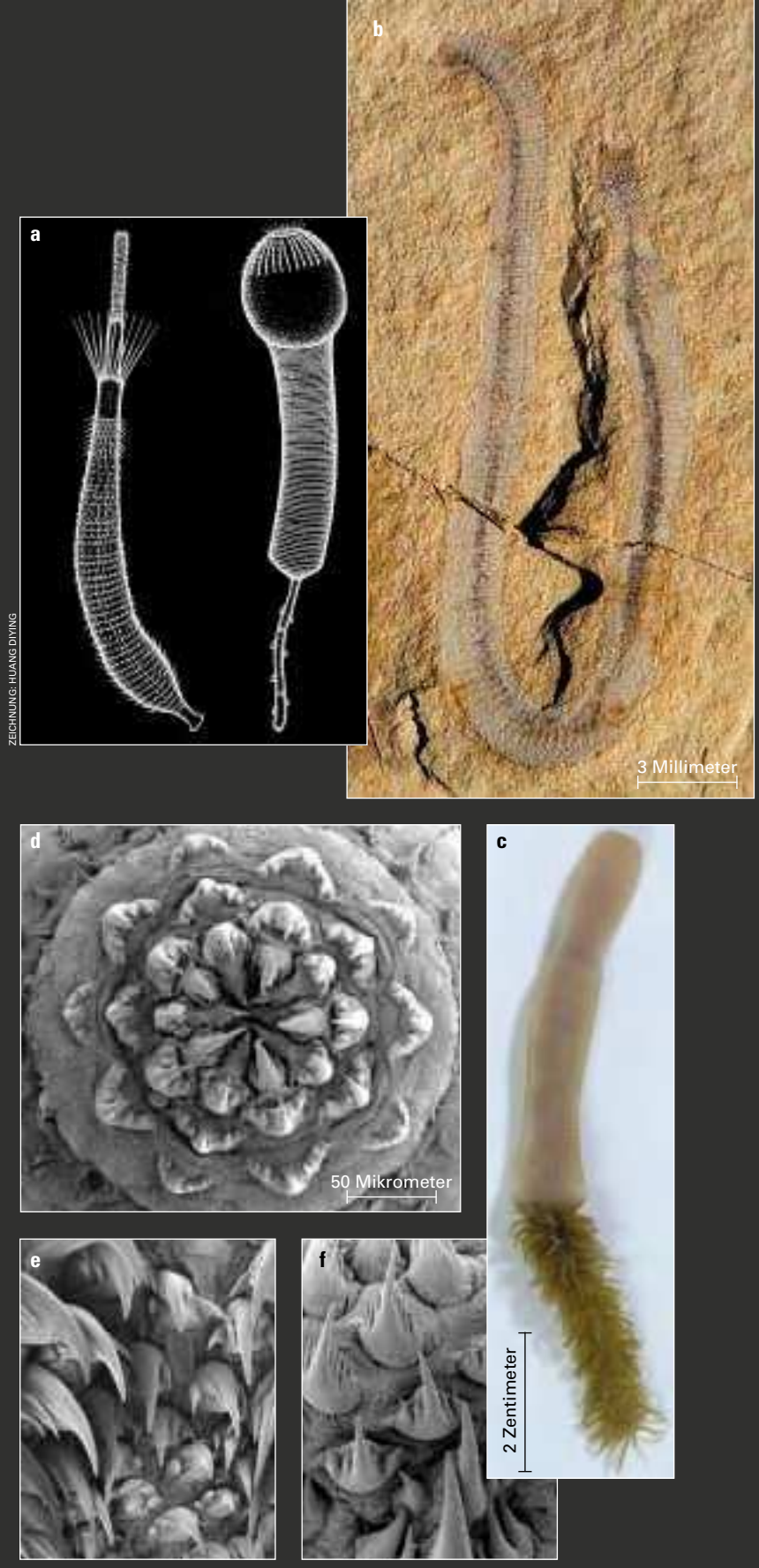
Vor mehr als einer halben Milliarde Jahren, im Kambrium, veränderte sich das Leben auf unserem Planeten grundlegend. In gerade einmal zehn Millionen Jahren – in geologischen Maßstäben nur ein Augenblick – tauchten in den Ozeanen Tierarten in einer Vielfalt auf wie nie zuvor. Der Formenreichtum vervielfachte sich, und neue Anpassungen traten auf. Damals erschienen die meisten heutigen Tierstämme auf der Bühne, große Entwicklungslinien mit je einem eigenen typischen Körperbauplan. Auch die Vertebraten, die Wirbeltiere, hatten ihr Debüt. Das Ganze geschah im Vergleich zu anderem so plötzlich, dass Fachleute von der kambrischen Explosion sprechen.

Bis in die 1980er Jahre verdankten wir unser Wissen über das Leben in dieser ältesten Periode des Erdaltertums hauptsächlich der so genannten Burgess-Fauna, einer Fossiliengesellschaft des Mittelkambriums vor etwa 515 Millionen Jahren (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/1979 S. 50). Entdeckt hatte sie zu Beginn des 20. Jahrhunderts Charles Walcott in den Bergen Britisch-Kolumbiens (Kanada). Mehrere andere Fossillagerstätten haben inzwischen unsere Erkenntnisse darüber erweitert, wie die ersten komplexen Ökosysteme organisiert waren, und deren Entstehen bereits vor den Zeiten der Burgess-Fauna belegt. Vor allem die Fundstätten bei Chengjiang und Kaili in Südchina sind hier bemerkenswert (siehe Karte S. 68), denn beide bergen eine Vielfalt vorzüglich erhaltener Fossilien, Erstere schon aus dem Unterkambrium vor etwa 525 Jahrmillionen.

Das in den letzten Jahren zusammengetragene Material ermöglichte den Paläontologen eine genauere Chronologie, wann die tierischen Entwicklungslinien auftauchten und sich diversifizierten. Mehr noch: Aus den zahlreichen inzwischen untersuchten chinesischen Fossilien ließ sich ein detailliertes Bild des Formenreichtums erstellen, der in kambrischen Meeren herrschte. Es offenbart ein frühes Ökosystem mit komplexer Struktur, bemerkenswert vor allem dadurch, dass seine Mitglieder von zahlreichen ökologischen Nischen Besitz ergriffen und räuberische Lebensweisen entwickelten. Mit ihren vielfältigen Wechselbeziehungen ist eine solche marine Gemeinschaft, geschaffen durch die kambrische Explosion, nicht mehr mit Frühe- ▶

ALLE FOTOS DIESES ARTIKELS: JEAN VANNIER / SAMMLUNG CHEN JUNYUAN

Die vielfältigen Fossilien von Chengjiang (China) zeigen trotz ihres Alters von 525 Millionen Jahren hervorragend erhaltene Strukturen, selbst bei Lebewesen mit ehemals weichem Körper – etwa Stummelfüßer (a und b) und Chordatiere (c) – oder mit unmineralisiertem Außenskelett, zum Beispiel Gliederfüßer (d und e).



ZEICHNUNG: HUANG DIYING

Bereits zu Beginn des Kambriums traten Organe auf, die für eine räuberische Lebensweise typisch sind und die das Entstehen von Jäger-Beute-Beziehungen belegen. Die fossilen Rüssel- oder Priapswürmer (a und b) besaßen einen ausstülpbaren Rüssel, besetzt mit zahlreichen Zähnchen, zum Packen ihrer Beutetiere. Heute lebende Arten (c) verfügen über ein ähnlich bestücktes Organ, hier mit dem Rasterelektronenmikroskop aufgenommen (d, e und f).

▷ rem zu vergleichen, vielmehr ähnelt sie dem heutigen Ökosystem im Meer.

Die paläontologische Forschung im Südosten Chinas reicht bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts zurück. Mehrere sukzessive Explorationskampagnen zeigten zwar, dass dort fossilreiche, dem Kambrium zuzurechnende Schichtenfolgen liegen (es umfasst nach jüngster Übereinkunft die Zeit vor 542 bis 488,3 Millionen Jahren). Doch erst 1984 entdeckte ein chinesischer Forscher – Hou Xiang-Guang von der Universität von Yunnan in Kunming – auch nahe der Kleinstadt Chengjiang die ersten Fossilien. Seitdem kamen an zahlreichen Stellen in der Provinz Yunnan Relikte ans Tageslicht, die für die 525 Millionen Jahre alte Chengjiang-Fauna charakteristisch sind.

Konservierendes Schlammbad

Der Grund für ihre außergewöhnlich gute Erhaltung liegt in den Einbettungsbedingungen. Die Lagen fossilhaltigen Gesteins sind feinkörnig, da aus ehemaligem Schlamm, und wechseln sich mit solchen aus gröberem Substrat ab. Diese Verhältnisse entstanden wahrscheinlich durch wiederkehrende Unwetter, die Sediment vom Grund aufwirbelten und die kleinen Partikel im Wasser suspendierten. In diesem Material fingen sich die Organismen und wurden dann schnell von dem sich absetzenden Schlamm zugedeckt, der ein sauerstoffarmes Milieu schuf. So waren ihre Körper vor Aasfressern, raschem Zerfall und vor mechanischer Zerstörung durch die Wasserbewegungen geschützt.

Zahlreichen Algen unter den Fossilien deuten darauf hin, dass das Meer bei Chengjiang recht flach war, womöglich nur einige Dutzend Meter tief. Denn Algen, die Photosynthese treiben, gedeihen nur dort, wo Licht hinkommt. Geochemische Untersuchungen haben zudem ergeben, dass wahrscheinlich Süßwasser in die marine Umwelt eingetragen wurde, was auf die Nähe von Land hinweist.

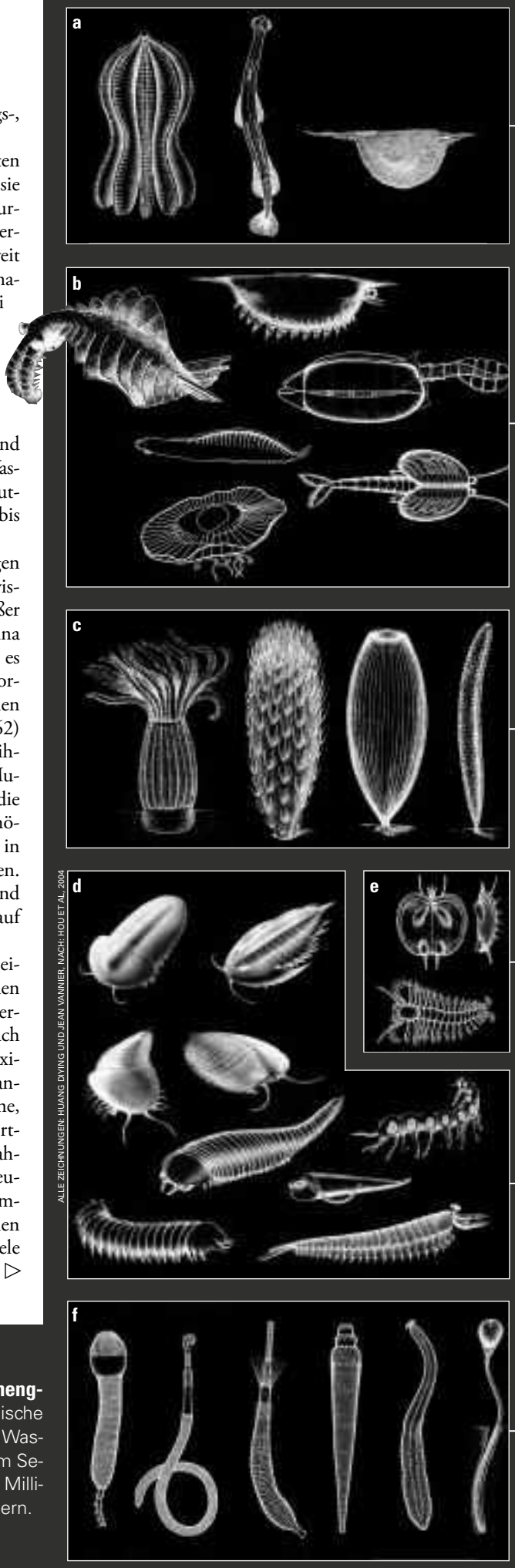
Die meisten fossilen Abdrücke sind braun oder rötlich und heben sich gut vom gelblichen Sedimentgestein ab (Fotos S. 62/63). Viele von ihnen stammen von Tieren mit einem weichen Körper wie Würmern oder quallenähnlichen Geschöpfen, andere von Lebewesen mit unmineralisiertem Außenskelett, insbesondere Gliederfüßern. Dank des ausgezeichneten Erhaltungszustands lassen sich sogar innere oder sensorische Strukturen

erkennen, zum Beispiel Verdauungs-, Atem- oder Sinnesorgane wie Augen.

Etwas jünger sind die Fundschichten bei Kaili in der Provinz Guizhou; sie stammen aus derselben Zeit wie die Burgess-Schiefer. So lassen sich Faunen vergleichen, die im Mittelkambrium weit voneinander entfernt im heutigen Kanada und China existierten. Auch in Kaili wurden inzwischen zahlreiche Arten registriert, darunter vor allem »Dreilapper« (Trilobiten) und andere Gliederfüßer sowie Schwämme und Stachelhäuter. Letztere Gruppe – zu der heute beispielsweise Seelilien, Seeigel und Seegurken zählen – lässt auf tieferes Wasser als bei Chengjiang schließen; vermutlich hatte es eine Tiefe von rund 150 bis 200 Metern.

In Chengjiang haben Paläontologen mehr als 150 verschiedene Spezies wissenschaftlich beschrieben. Gliederfüßer stellen die Hälfte der örtlichen Fauna (Fotos d und e, S. 63). Daneben gibt es Würmer und Schwämme, ferner Chordatiere mit ihrem charakteristischen »Achsenstab« im Rücken (Foto c, S. 62) sowie Armfüßer (Brachiopoden) mit ihrer zweiklappigen Schale, die an Muscheln erinnert. Zusammen vertreten die Tiere rund zwanzig Stämme und gehören meist Gruppen an, die noch heute in den Meeren eine wichtige Rolle spielen. Nur zwanzig Prozent aller Arten sind schwierig einzuordnen und entfallen auf inzwischen ausgestorbene Gruppen.

Diese Fauna vermittelt nicht bloß einen guten Eindruck von der biologischen Vielfalt in den Küstenzonen der unterkambrischen Meere. Sie offenbart auch eine erstaunliche funktionelle Komplexität – ob es sich nun um den Sehsinn handelte, um Verdauungs- oder Atemorgane, Körperanhänge zur kriechenden Fortbewegung, Fangeinrichtungen für Nahrungspartikel, Greifwerkzeuge zum Beutefang, Auftriebsorgane oder Schwimmfortsätze. So besaßen einige Organismen der Chengjiang-Fauna – darunter viele Gliederfüßer – Stielaugen wie heutige ▷



ALLE ZEICHNUNGEN: HUANG DYING UND JEAN VANNIER, NACH: HOU ET AL. 2004

Die über 150 bekannten Arten von Chengjiang besiedelten zahlreiche ökologische Nischen in verschiedenen Etagen der Wassersäule, auf dem Grund und sogar im Sediment. Ihre Körpergröße reichte von Millimetern bis hin zu mehreren Dezimetern.

Was führte zur kambrischen Explosion?

Mehrmals haben Ereignisse das Leben in den letzten 600 Millionen Jahren grundlegend verändert. Dies gilt beispielsweise für das große Artensterben am Übergang vom Perm zur Trias vor 250 Millionen Jahren, durch das neun von zehn Spezies verschwanden. Auch am Ende der Kreidezeit vor 65 Millionen Jahren ereignete sich ein Massensterben; prominenteste Opfer waren die Dinosaurier. Diese Krisen hatten alle eines gemein: In ihrem Gefolge bauten sich Ökosysteme mit neuen Arten auf. Die überlebenden Gruppen fächerten sich nämlich auf und besetzten die verwaisten Nischen. Die Explosion der biologischen Vielfalt an der Schwelle vom Präkambrium zum Kambrium lässt sich auf diese Weise jedoch nicht erklären. Sie hatte offenbar andere Ursachen, aber welche?

Manche Forscher machen ein Ansteigen des Sauerstoffgehalts in Atmosphäre und Meerwasser verantwortlich. Tatsächlich waren einige der kambrischen Lebewesen sehr aktiv, insbesondere räuberische und schwimmende Arten, und hatten daher wohl einen höheren Sauerstoffbedarf. So verlockend diese Hypothese auch sein mag – ihr mangelt es an präzisen Belegen. Zum Beispiel hat Andrew Knoll von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) nachgewiesen, dass die nötige Sauerstoffkonzentration bereits weit vor dem Kambrium erreicht wurde.

Andere Wissenschaftler argumentieren mit Gletschermassen, die gegen Ende des Präkambriums den Globus bedeckten. Nach dieser »Schneeball-Erde-Theorie« war möglicherweise die gesamte Oberfläche des Planeten vereist, einschließlich der Ozeane. Allerdings lässt sich zwischen einem solchen Katastrophenszenario und dem Auftreten neuartiger Lebensformen nur schwer ein Zusammenhang herstellen. Man könnte sich höchstens vorstellen, dass das präkambrische Ökosystem zusammenbrach und dabei eine Reihe freier ökologischer Nischen hinterließ.

Dass sich die Tierwelt derart rasch entfaltete, liegt vielleicht an Veränderungen in der Nahrungskette, insbesondere einer höheren Primärproduktion der Ozeane. Primärproduzenten erzeugen beispielsweise durch Photosynthese aus anorganischem Material eigene Biomasse.

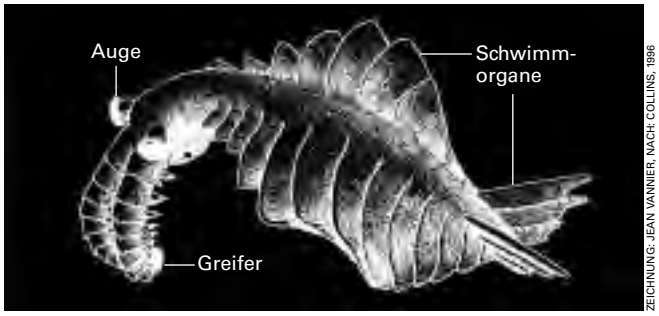
Alle Tiere leben letztlich von Primärproduzenten an der Basis von Nahrungsketten und -netzen. Nick Butterfield von der Universität Cambridge in England geht davon aus, dass vor allem die Entstehung von tierischen Planktonorganismen dann die marine Nahrungskette erheblich veränderte. Das in deren Kotpartikeln noch enthaltene organische Material wurde – zusammen mit anderem so genannten Detritus aus zerfallenden Tier- und Pflanzenresten – wahrscheinlich zu einer neuen, reichen Futterquelle für die Bewohner am Meeresboden. Dies erklärt zwar nicht die kambrische »Explosion«, hat aber vermutlich die Entwicklung der ersten kambrischen Organismen begünstigt. Jedenfalls verkomplizierte sich durch räuberische Lebensweisen das Miteinander der Arten, was sicherlich den biologischen Diversifikationsprozess verstärkte.

Die kambrische Explosion, mit dem Erscheinen der meisten heutigen Tierstämme, ist allerdings nur die letzte Phase einer langen evolutiven Entwicklung, die genetische und embryonale Aspekte umfasst und bereits im Präkambrium begann. Ein paläontologischer Beleg sind die erst kürzlich entdeckten fossilen Bilaterier aus etwa 590 Millionen Jahren alten Schichten in China (siehe den Beitrag S. 70).

▷ Garnelen, sogar die zugehörigen neuralen Strukturen. Auch bei gewissen primitiven Wirbeltieren waren Sehorgane vorhanden. Was diese Augen überhaupt zu erkennen vermochten, kann niemand sagen, aber allem Anschein nach war das Sehvermögen im Unterkambrium bereits weit entwickelt. Der Vorteil für die Besitzer lag auf der Hand, denn damit konnten sie Beute erspähen, Fressfeinde entdecken und die tagesperiodischen Veränderungen der Helligkeit registrieren. Die Atmung funktionierte bei den Gliederfüßern von Chengjiang genauso wie bei modernen Krebstieren (Crustaceen): Den im Wasser gelösten Sauerstoff resorbierten sie über zahlreiche verzweigte Blättchen an der Beinbasis, die an den Fossilien oft noch erhalten sind.

Achtzig Prozent der Tierstämme, die in Chengjiang vorkommen, fehlen in älteren, präkambrischen Schichtenfolgen – was die Auffassung bestärkt, dass sich die Evolution an der Wende vom Präkambrium zum Kambrium beschleunigte. Gleichzeitig sind mehr als die Hälfte aller heutigen Stämme bereits in der Chengjiang-Fauna vorhanden. So haben Chen JunYuan und Huang DiYing vom Nankinger Institut für Geologie und Paläontologie erst kürzlich Vertreter der Priaps- oder Rüsselwürmer (Priapuliden, Foto S. 64), der Spritzwürmer (Sipunculiden) und der Pfeilwürmer (Chaetognathen) entdeckt. Stämme, die in der kam-

▼ **Der größte Räuber der Chengjiang-Fauna war *Anomalocaris*. Über einen Meter lang, besaß er Schwimmorgane und vorn mächtige Greifer.**



ZEICHNUNG: JEAN VANNIER, NACH: COLLINS, 1996

brischen Fauna »fehlen«, spielen entweder auch heute eine untergeordnete Rolle oder ihre Mitglieder waren sehr klein und zart gebaut, sodass sie kaum als Fossil erhalten sein dürften.

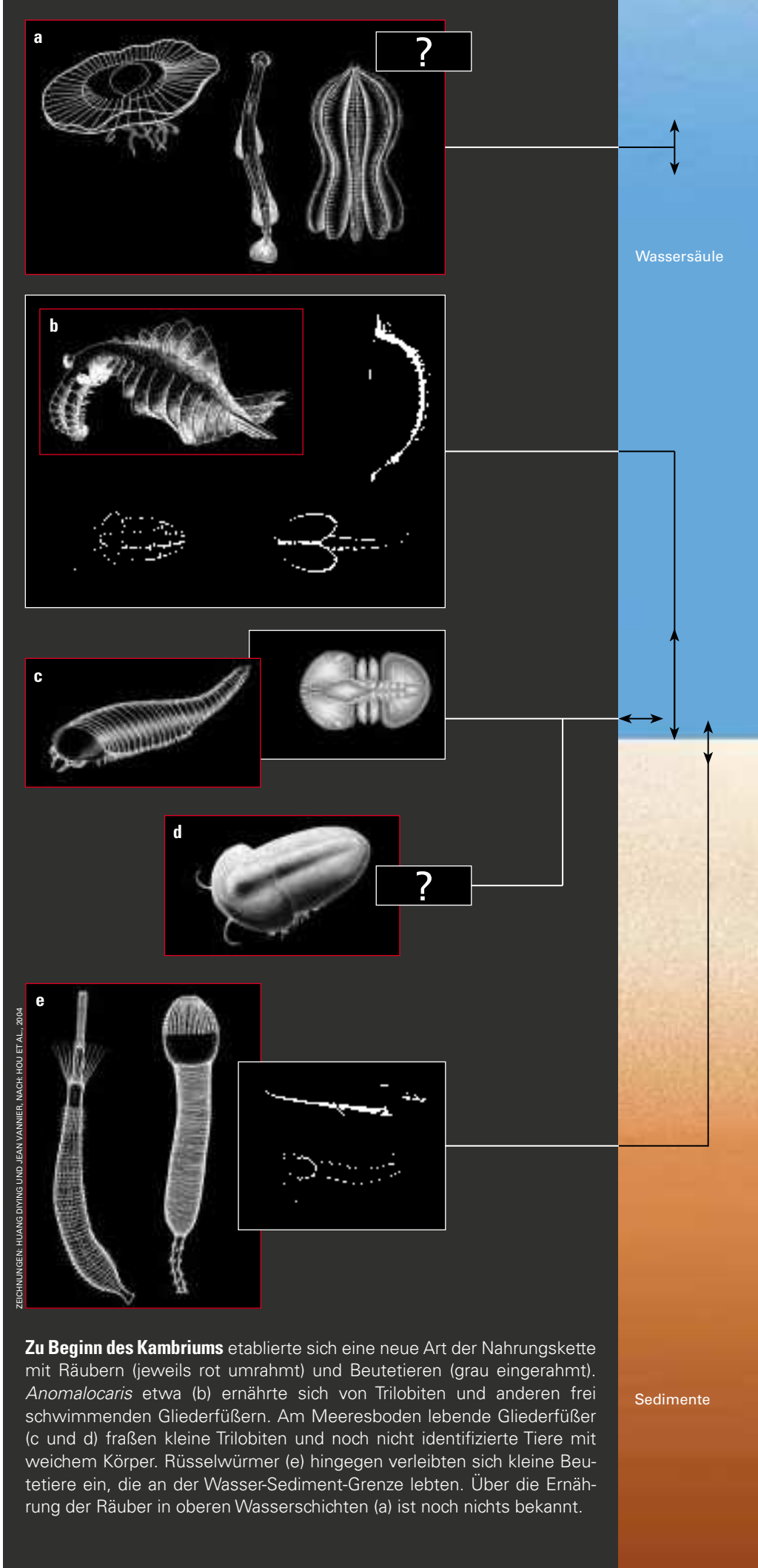
Zwei erstaunliche Funde machte Shu Degans von der Universität Xian 1999 und 2003: Tierformen, die überraschend den Larven heutiger Neunaugen ähneln. Neunaugen, aalförmig und kieferlos, stehen an der Basis der Wirbeltiere. Demnach begann die Geschichte der Wirbeltiere – und damit letztlich unsere eigene – bereits zu Anfang des Kambriums. Dies untermauert die Vorstellung weiter, dass die Körperbaupläne heutiger Tiere mehrheitlich schon vor einer halben Milliarde Jahren existierten.

Alt und dennoch modern

Einige der in Chengjiang entdeckten Tiere besitzen allerdings kein modernes Gegenstück und geben uns noch Rätsel auf. Hierzu gehören beispielsweise kleine quallenähnliche Lebewesen, die so genannten Eldoniiden, des Weiteren die Vetulicoliden, die einige Forscher als Chordatiere deuten, obwohl ihre Körpersegmentierung eher an Gliederfüßer erinnert, sowie die Hyolithen, kleine konische Tiere, die auf dem Meeresgrund lebten. Dennoch, wie schon gesagt: Auch einem Zoologen des 21. Jahrhunderts wäre das kambrische Meer vertraut vorgekommen.

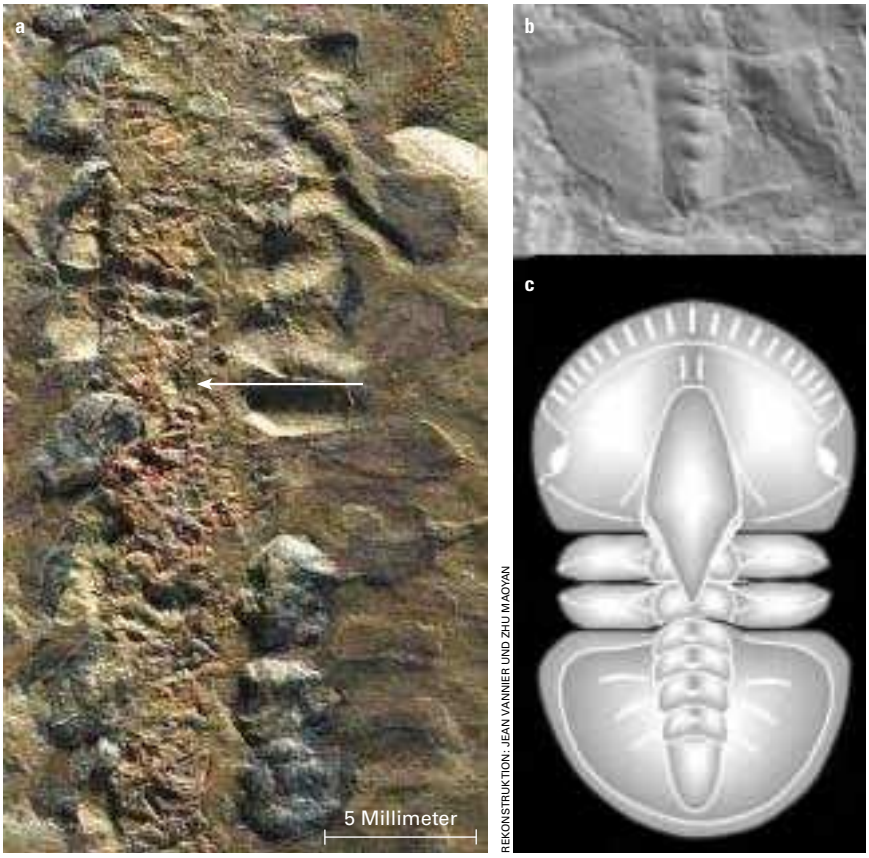
Jahrelang waren Paläontologen vor allem damit beschäftigt, diese Vielfalt zu katalogisieren. Nur wenige befassten sich damit, wie das damalige Ökosystem aus marinen Lebensgemeinschaften und ihrem Lebensraum funktionierte. Heute sind in der Meereswelt alle ökologischen Nischen besetzt, und die Organismen stehen durch Nahrungsketten und -netze miteinander in Beziehung. Doch wie war dies in den Anfängen des Kambriums?

Wie die Fossilien verraten, bevölkerte ein breites Spektrum von Tieren den Meeresboden oder Bereiche dicht darüber und darunter (Schema S. 65). An der Boden-Wasser-Grenze lebten beispielsweise winzige Trilobiten sowie die konisch geformten Hyolithen, die möglicherweise zu den Mollusken, den Weichtieren, gehören (moderne Vertreter sind unter anderem Schnecken und Tintenfische). Auch die Bradoriiden – millimetergroße, durch einen zweiklappigen Rückenschild geschützte Gliederfüßer – kamen extrem häufig in die- ▷



ZEICHNUNGEN: HUANG DIYING UND JEAN VANNIER, NACH: HOU ET AL., 2004

Zu Beginn des Kambriums etablierte sich eine neue Art der Nahrungskette mit Räubern (jeweils rot umrahmt) und Beutetieren (grau eingerahmt). *Anomalocaris* etwa (b) ernährte sich von Trilobiten und anderen frei schwimmenden Gliederfüßern. Am Meeresboden lebende Gliederfüßer (c und d) fraßen kleine Trilobiten und noch nicht identifizierte Tiere mit weichem Körper. Rüsselwürmer (e) hingegen verleibten sich kleine Beutetiere ein, die an der Wasser-Sediment-Grenze lebten. Über die Ernährung der Räuber in oberen Wasserschichten (a) ist noch nichts bekannt.



REKONSTRUKTION: JEAN VANNIER UND ZHU MAOYAN

Am Fundort Kaili in China wurde dieser Verdauungskanal eines Gliederfüßers entdeckt (a). Er enthält Überreste kleiner Trilobiten aus der Gruppe der Agnostida (b); daneben die Rekonstruktion eines Exemplars dieser Beute (c).

▷ ser Übergangszone vor und besetzten wahrscheinlich eine ähnliche ökologische Nische wie heute die Muschelkrebse (Ostracoden). Hierfür spricht unter anderem, dass die ältere Gruppe mit dem Erscheinen der jüngeren vor 490 Millionen Jahren verschwand.

In den ersten Zentimetern der Bodenschicht fanden zahlreiche grabende Tiere Zuflucht und Nahrung, vor allem Würmer wie Rüssel- und Spritzwürmer. Die Zeugnisse ihres Treibens sind bisweilen heute noch erhalten, in Form ihrer Baue und Fortbewegungsspuren.

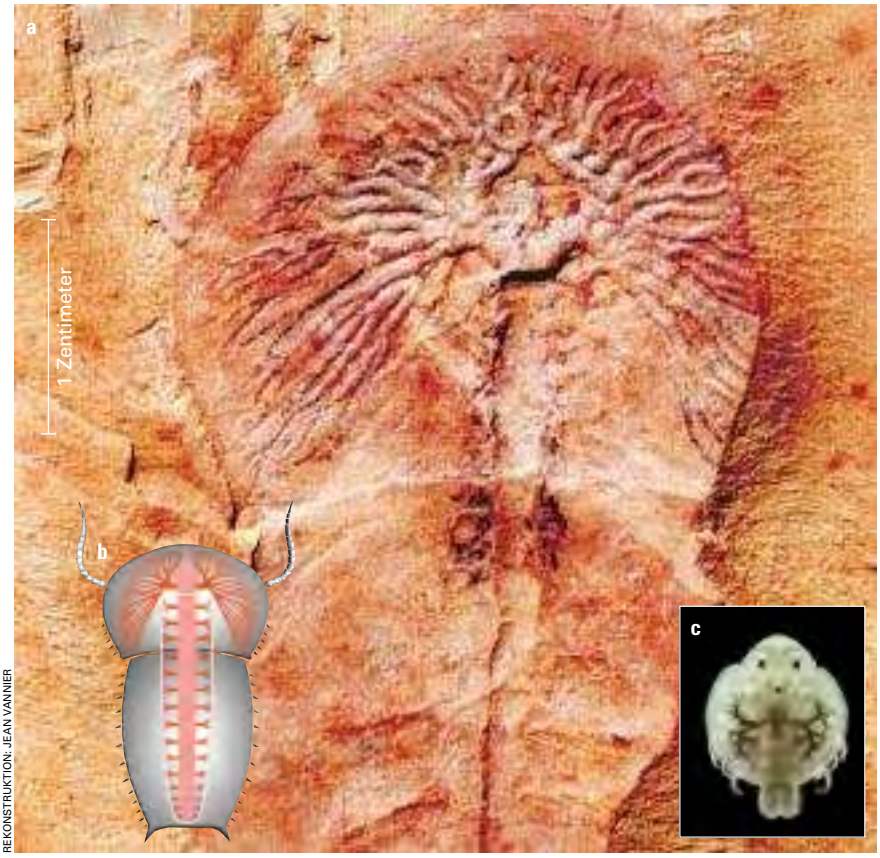
Schließlich hielten sich auch in der Wassersäule zahlreiche Organismen auf, dauernd oder zumindest vorübergehend. Hierzu zählen Pfeilwürmer, Rippenquallen und quallenähnliche Tiere sowie Gliederfüßer mit zweiklappigem Schild, von denen einige – wie *Isoxys* – eine Größe von mehreren Zentimetern erreichten. Diese Formen zeigen nämlich klar erkennbare Anpassungen an die schwimmende oder schwebende Lebensweise, wie sie etwa von heutigem Plankton bekannt sind. Jüngst wurden an anderen chinesischen Fundstätten kleine Gliederfüßer mit zweiklappigen Schild entdeckt, die heutigen Hochsee-Muschelkrebsen stark ähneln. Dies spricht für die Existenz von reichlich tierischem Plankton, das weniger flaches Meer bevölkerte. Sein Erscheinen im Unterkambrium war wahrscheinlich eine wegbereitende Innovation für die Entwicklung heutiger Nahrungsketten.

Die Fossilien aus China liefern uns zugleich wesentliche Informationen über die Räuber-Beute-Beziehungen in kambrischen Meeren. In Kaili stieß man beispielsweise auf ein etwa zehn Zentimeter langes Stück eines mittelkambrischen Gliederfüßers, bei dem der Verdauungstrakt noch gut zu erkennen ist (siehe Abbildung links). Die beidseits erhaltenen Verdauungsdrüsen produzierten vermutlich reichlich Enzyme. Der Trakt ist noch voller Nahrungsreste: Überbleibsel winziger Trilobiten, die in großer Zahl in der Grenzschicht zwischen Wasser und Boden lebten. So etwas ist bei kambrischen Versteinerungen äußerst selten. Ein anderes Beispiel stammt aus dem gleichaltrigen Burgess-Schiefer: ein Exemplar des räuberischen Rüsselwurms *Ottoia* mit aufgereihten Hyolithen im Darm.

Die Fossilien aus Chengjiang sind älter, aber auch bei ihnen wurden vollständige Verdauungsapparate entdeckt, vor allem bei Naraoiiden, einer Schwestergruppe der Trilobiten (siehe Abbildung rechte Seite). Die Funktionsweise dort erschließt sich aus dem Vergleich mit heutigen Tieren. So zeigt die Fischlaus *Argulus*, ein an Fischen Blut saugendes Krebstier, ganz ähnliche verzweigte Blindsäcke, die mit dem Darmrohr in Verbindung stehen. Dort speichert der Parasit das Blut seiner Opfer und verdaut es dann langsam mit seinen Enzy-

ALISON KENDALL

Die Fossilien aus der Nähe von Chengjiang haben ebenso wie die von Kaili unser Verständnis der so genannten kambrischen Explosion erweitert. Präkambrische Gesteine der Doushantuo-Formation bei Weng'an lieferten neue Informationen über die frühe Evolution der Tiere. Dort wurde der nun älteste fossile Bilaterier entdeckt (siehe den Beitrag S. 70).



REKONSTRUKTION: JEAN VANNIER

Im Kambrium zeigen sich erstmals viele komplexe Organe, wie dieser baumartig verzweigte Verdauungsapparat in einem Gliederfüßer (a, b rekonstruiert). In den Hohlräumen wurde Nahrung gespeichert und verdaut, wohl ähnlich wie bei der Fischlaus (c), einem heutigen Krebstier, das Blut aus Fischen saugt.

men. Von heutigen Pfeilschwanzkrebsen und gewissen Spinnentieren kennt man vergleichbare bäumchenartige Strukturen, die dazu dienen, weiches Gewebe oder Flüssigkeiten aufzunehmen und zu verdauen. Man kann also davon ausgehen, dass Naraoiiden und andere kambrische Gliederfüßer sich von ähnlicher Kost ernährten.

Wie unsere Arbeitsgruppe entdeckte, besaßen einige kambrische Würmer einen mit Zähnchen bewehrten Rüssel, der wahrscheinlich ein hochwirksames Fanginstrument darstellte (siehe Abbildung S. 64). Auch solche Greiforgane weisen zuverlässig auf räuberisches Verhalten hin. Hiervon konnten wir uns auf der Meeresforschungsstation von Kristineberg in Schweden überzeugen: Moderne Rüsselwürmer, die von kambrischen Formen abstammen, packen ihre Beute mit einem ausstülpbaren, zähnchenbesetzten Fortsatz der Mundöffnung. Dann befördern sie das Opfer langsam in den Verdauungskanal, indem sie den Fortsatz ähnlich wie den Finger eines Handschuhs wieder einstülpen.

Welch bedeutende Rolle die räuberische Lebensweise im kambrischen Ökosystem spielte, zeigen auch andere, weniger direkte Belege: die so genannten Koprolithen. Diese versteinerten Kotballen geben Aufschluss über die Nahrung. Die in Chengjiang gefundenen Exemplare sind eiförmig oder lang gestreckt und enthalten die unverdauten Reste von Beutetieren wie Bradoriiden, Hyolithen oder ursprünglichen Garnelen. Es handelte sich um Organismen, die sich auf oder dicht über dem Meeresboden aufhielten. Die größten Hinterlassenschaften stammen wahrscheinlich von *Anomalocaris* (siehe Abbildung S. 66), dem größten bekannten Jäger der kambrischen Fauna. Bis schätzungsweise über einen Meter lang, war sein Körper auf Schwimmen und Beutefang zugeschnitten und verfügte ebenfalls über eine Reihe von Verdauungsdrüsen.

Wie aus der Erforschung der chinesischen Lagerstätten hervorgeht, wies also das marine Ökosystem schon in den Anfängen des Kambriums eine erstaunliche Vielfalt auf: sowohl was Körperbau und Lebensweise seiner Mitglieder anbelangt als auch die von ihnen besetzten ökologischen Nischen. Bereits in sich strukturiert, mit zahlreichen komplexen Beziehungen zwischen den Spezies, hatte es große Ähnlichkeit mit den Verhältnissen in heutigen Meeren. Sein damals völlig neuartiges Funktionsschema ist mit älteren, präkambrischen Ökosystemen nicht zu vergleichen. So waren etwa die Faunen vom Ediacara-Typ, die an etlichen Stellen der Erde überliefert sind, vor 565 bis 540 Millionen Jahren biologisch weniger komplex. Warum aber erfolgte gerade zu Beginn des Kambriums eine derartige »ökologische Revolution«?

Noch gibt es erst fragmentarische Antworten, offenbar waren jedoch mehrere Faktoren entscheidend. Die so genannte Primärproduktion – durch Organismen, die lebloses Material in Biomasse verwandeln und damit Grundlage jeder Nahrungskette bilden – wurde in den Ozeanen diversifiziert, das Nahrungsnetz veränderte sich, beispielsweise durch das Auftreten von tierischem Plankton, neue Futterressourcen wurden verfügbar und es gab zahlreiche freie ökologische Nischen. Vor allem aber kam die räuberische Lebensweise auf, das »Fressen und Gefressenwerden«, und mit ihr eine Fülle sie begleitender Verhaltensstrategien und Anpassungen (siehe Kasten S. 66). Ökologische Faktoren mögen zwar nicht alles erklären – aber durch die völlige Neuorganisation des Ökosystems Meer hat sich die Evolution wahrscheinlich beschleunigt. ◁

Der Paläobiologe **Jean Vannier** ist Forschungsdirektor des französischen Nationalen Forschungsrats und Mitglied der Forschungseinheit »Paläoumwelten und Paläobiosphäre« an der Claude-Bernard-Universität in Lyon.

Direct evidence for predation on trilobites in the Cambrian. Von Mao-Yan Zhu et al. in: Biology Letters, Bd. 271, S. 277, 2004

The Cambrian fossils of Chengjiang, China. The flowering of early animal life. Von Xian-Guang Hou et al. Blackwell Publishing 2004

On the origin of phyla. Von James W. Valentine. The University of Chicago Press, Chicago 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Die frühe Evolution der Tiere

Wie winzige Fossilien belegen, sind Tiere mit der gleichen Grundsymmetrie wie der Mensch mindestens 50 Millionen Jahre früher entstanden als bisher angenommen.

Von David J. Bottjer

Unsere ganze Hoffnung ruhte auf ihr: einer Wagenladung frisch gesammelter schwarzer Felsbrocken aus einer 580 bis 600 Millionen Jahre alten Fossillagerstätte in der chinesischen Provinz Guizhou. Wir blickten dem entschwindenden Laster nach, der sie zum Labor bringen sollte. Wir, das hieß: Jun-Yuan Chen, ein Paläontologe von der chinesischen Akademie der Wissenschaften in Nangjing (Nanking), und ich mit meinem Kollegen Stephen Q. Dornbos, der damals an der Universität von Südkalifornien in Los Angeles arbeitete. »Da drin ist ein Bilaterier«, prophezeite Chen siegessicher.

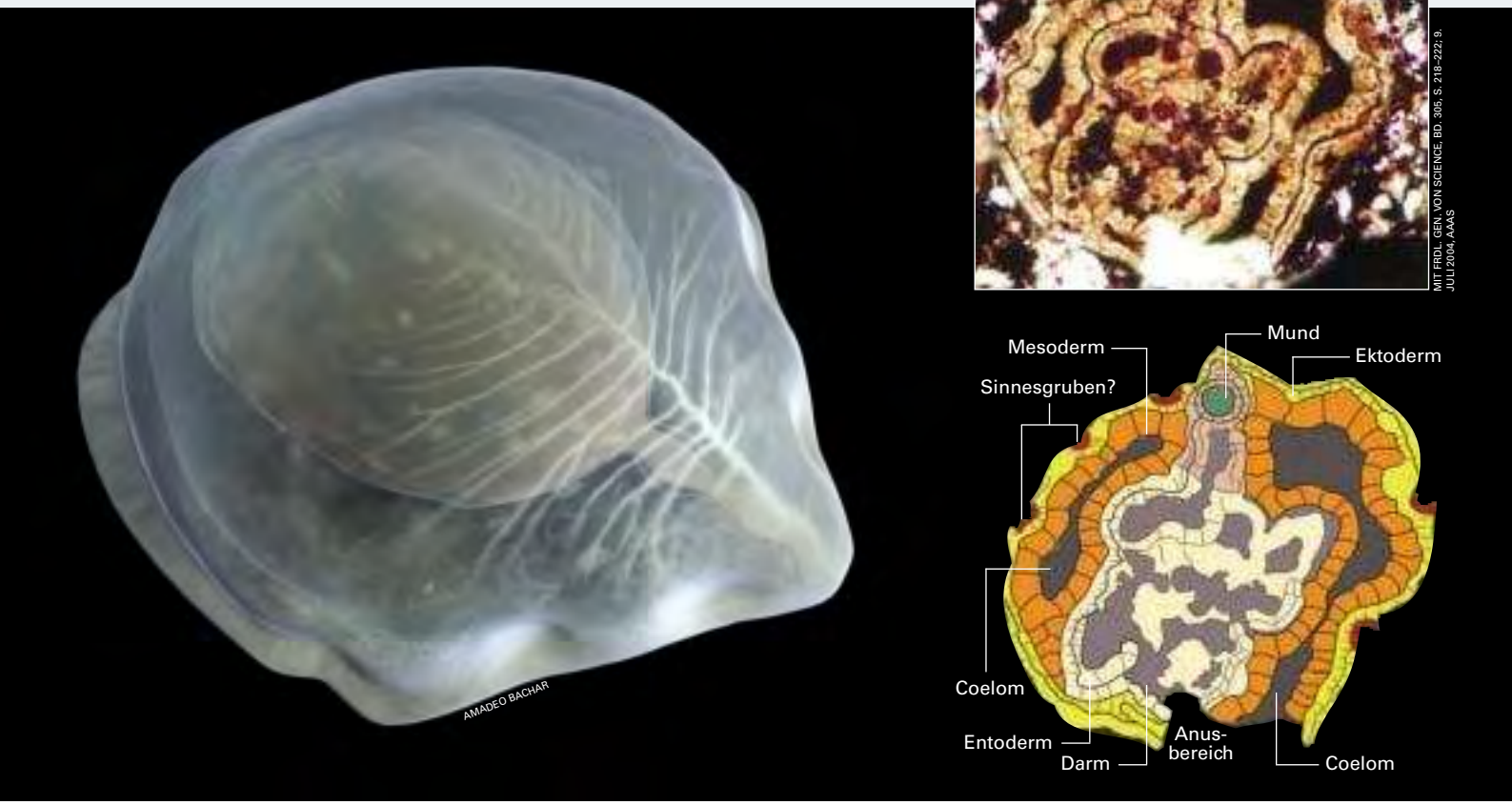
Wir waren 2002 nach Guizhou gekommen, um nach mikroskopisch kleinen Fossilien von einigen der ältesten Tiere der Welt zu suchen, vor allem solchen mit Bilateralsymmetrie. Die Entstehung dieser Symmetrie, die den Körper mit einem gedachten Schnitt in spiegelgleiche Hälften spaltet, zumindest im Prinzip, gilt als ein Meilenstein in der Geschichte des Lebens. Die ersten vielzelligen Tiere waren asymmetrische, klumpenförmige Meeresbewohner – Schwämme. Sie filterten Nahrungspartikel aus einer selbst erzeugten Wasserströmung. Etwas komplexer gebaut sind primär radiärsymmetrische Wasserbewohner – Nesseltiere wie Quallen und Polypen. Sie besitzen spezialisierte Nesselzellen zum Beutefang. Alles Übrige – von Plattwürmern bis zum Menschen – gehört zu den Bilateria, wörtlich: den Bilateral- oder Zweiseitentieren. Sie zeigen zumindest in irgendeinem ihrer Lebensstadien, und sei es nur als Larve, die typische hälftige Aufteilung sowie einen Körper mit gewöhnlich Mund, Darm, After und sekundärer Leibeshöhle, die aus dem so genannten dritten Keimblatt hervorgeht.

Die große Mehrheit der Bilaterier erschien in einer Zeit der evolutiven Neuerungen, die als kambrische Explosion bekannt ist (Kasten S. 72/73). Die erdgeschichtliche Periode des Kambriums begann vor etwa 542 Jahrmillionen. Davor ist die fossile Überlieferung vergleichsweise dürftig, und noch vor nicht allzu langer Zeit galten rund 555 Millionen Jahre alte Fossilien als früheste Bilaterier. Der Fundmangel machte es unmöglich, Hypothesen darüber zu testen, was diese explosive Entfaltung ausgelöst hatte – oder ob das Ganze vielleicht bloß so explosiv erschien, weil frühere Formen so wenige Spuren von sich hinterlassen hatten. Die Forschung der letzten Jahre – unsere in Guizhou mit eingeschlossen – hat nun gezeigt, dass komplexe, bilaterale Tiere mindestens schon 50 Millionen Jahre vor Beginn des Kambriums entstanden sind.

Ein wichtiger Anstoß, nach solchen Fossilien zu suchen, waren Probleme mit der so genannten molekularen Uhr. Sie basiert auf der Annahme, dass sich be-

IN KÜRZE

- Die **Entstehung der Bilateralsymmetrie** mit einer linken und rechten Körperhälfte stellte einen entscheidenden Schritt in der frühen Evolution der Tiere dar.
- Das vom Autor und seinen Kollegen entdeckte neue Fossil eines Bilateriers ist mit **580 bis 600 Millionen Jahren** deutlich älter als bisherige und stützt einen genetischen Stammbaum, der die Wurzeln dieser Hauptgruppe der Tiere bei 573 bis 656 Millionen Jahren rekonstruiert.
- Die winzigen Fossilien verraten überdies, dass die Evolution **innere Komplexität** vor großer Körpergröße hervorgebracht hat.



▲ *Vernanimalcula*, das nun älteste bekannte fossile Tier mit dem Grundbauplan eines Bilateriers, lebte vor 580 bis 600 Millionen Jahren im Meer. In dieser Rekonstruktion (links) gewaltig vergrößert, war es in Wirklichkeit nur so groß wie der Punkt am Satzende. Das besterhaltene Exemplar (oben) zeigt die typischen Merkmale eines Bilateriers: ein bilateralsymmetrischer, spiegelgleicher Körper mit sekundären Leibeshöhlen (Coelom), Mund und Darm. Der After, bei diesem Exemplar nicht erhalten, wurde in der Zeichnung nach anderen Exemplaren ergänzt (unten).

stimmte evolutionäre Veränderungen im Erbgut über Millionen von Jahren hinweg betrachtet mit einer gleich bleibenden Rate anhäufen können. Spaltet sich eine Entwicklungslinie in zwei auf, sammelt jede von da an ihre eigenen unverwechselbaren Mutationen an. Je stärker sich also zwei Linien in DNA-Abschnitten unterscheiden, desto weiter zurück müsste ihr gemeinsamer Ursprung liegen. Die Unterschiede bieten ein Maß für die verstrichene Zeit, sofern man weiß, wie schnell die molekulare Uhr tickte.

Ungleiche molekulare Uhren

Ein Forscherteam um Gregory Wray von der Duke-Universität in Durham (Nord-Carolina) schätzte anhand einer bei Wirbeltieren ermittelten Tickrate 1996, dass sich die Bilaterier schon tief im Präkambrium, vor 1,2 Milliarden Jahren, von einfacher gebauten Tieren abgespaltet haben. Weitere solche Studien ergaben erheblich voneinander abweichende Schätzwerte für diesen Zeitpunkt: zwischen einer Milliarde Jahren und einem Zeitpunkt kurz vor Beginn des Kambriums. Derartige Diskrepanzen weckten natürlich Zweifel an der Methode.

In einer neueren Studie griff Kevin Peterson vom Dartmouth College in Hanover (New Hampshire) mit seinen Kollegen einige der Bedenken auf. Vor allem benutzte das Team eine von wirbellosen Tieren abgeleitete Tickrate. Die gewählte Uhr geht schneller als eine, die auf Wirbeltiere geeicht ist. Ergebnis: Der letzte gemeinsame Vorfahr aller Bilateria ist wesentlich jünger, lebte irgendwann zwischen 573 und 656 Millionen Jahren. Aber selbst an dieser Datierung entzündeten sich Kontroversen. Nur echte Fossilfunde konnten somit unwiderlegbare Beweise liefern, wann Bilateraltiere zumindest schon existierten. Auch ich gehörte zu den Paläontologen, die sich davon angeregt auf die Suche machten.

Ein gewaltiges Problem besteht darin, dass solche Tiere keine Hartteile besaßen, die mineralisieren und zu »Versteinerungen« werden können. Man muss die äußerst seltenen Ablagerungen finden, die auf Grund des Gesteinstyps und der darin ablaufenden chemischen Prozesse feinste Körperdetails solcher Tiere überliefern. Nur einige Dutzend Lagerstätten mit Weichteilerhaltung sind aus verschiedenen Zeitperioden weltweit überhaupt bekannt. Eine davon liegt in der südchinesischen Provinz Yunnan bei Chengjiang (siehe Karte S. 68 im vorherigen Beitrag). Aus ihr stammen viele neue wichtige Funde von Weichkörpertieren, die für die Zeit der kambrischen Explosion charakteristisch sind. An einigen Stellen der Erde gibt es zudem präkambrische Lagerstätten mit der so genannten Ediacara-Fauna, bezeichnet nach dem ersten Fundort, den südaustralischen Ediacara-Hügeln. Neben merkwürdigen Weichkörpertieren und Bohrgängen liefert sie Belege für frühe Formen von Bilateriern.

Überraschenderweise berichteten 1998 zwei verschiedene Paläobiologen- ▷

Explosion oder bloß ein Aufblühen?

Die kambrische Explosion ist mehr als nur eine plötzliche Zunahme in der Formenvielfalt der Bilaterier – also von Tieren mit einer rechten und linken Körperhälfte. Ihre Geschichte ist komplizierter – und interessanter. Wie neuere Forschungen zeigen, spielte eine dramatische Intensivierung der Wechselbeziehungen zwischen Tieren bei diesem Diversitätszuwachs eine große Rolle:

▶ Tiere begannen die Umwelt zu verändern. Die neu geschaffenen Bedingungen boten nicht nur Chancen. Beispielsweise waren präkambrische Bewohner des Meeresbodens daran angepasst, sich über mattenartige Bakterienrasen zu bewegen, die damals den Großteil des Grunds überzogen und schon seit der Entstehung des Lebens zum Ökosystem gehörten. Im Unterkambrium aber, das vor 542 Millionen Jahren begann, befähigten evolutive Neuerungen einige Bilaterier, sich senkrecht ins Sediment zu bohren. Diese Grabungstätigkeit zerstörte die allgegenwärtigen Bakterienmatten und hinterließ eine breiige Bo-

vor 542 Milliarden Jahren: die Erde entsteht

ALLE: AMADEO BACHAR

Vernanimalculas
Platz in der Erdgeschichte

Mit ihrer Entdeckung verschob sich der erste Nachweis komplexer Tiere mit Bilateralsymmetrie auf 50 Millionen Jahre vor Beginn des Kambriums.

vor etwa 3,5 Milliarden Jahren: Entwicklung einzelliger Mikroben, teils zu Matten assoziert

mikrobielle Filamente

vor etwa 1,2 Milliarden Jahren: erste komplexe vielzellige Lebensformen vorhanden

Bangiomorpha

präkambrische Ära

▷ teams über bemerkenswert gut erhaltene Weichteilfossilien aus einer weiteren präkambrischen Lagerstätte: Die Doushantuo-Formation in Guizhou offenbarte winzige reife Schwämme und Nesseltiere – sowie mikroskopisch kleine Eier und Embryos. Ein Großteil des fossilführenden Sedimentgesteins besteht aus Calciumphosphat (Apatit), das die einstigen Gewebe detailgetreu ersetzt hat. Nach aktuellen Untersuchungen sind diese Gesteine mit höchstwahrscheinlich 580 bis 600 Millionen Jahren älter als die der Ediacara-Fauna. Folglich lebten die Organismen rund 40 bis 55 Jahrmillionen vor Beginn des Kambriums.

Jedem fachlich Interessierten war schnell klar, dass die Doushantuo-Formation ein Fenster zur Frühzeit der Bilaterier öffnen könnte. Auf Drängen von Eric Davidson, einem Molekularbiologen am California Institute of Technology in Pasadena, fand sich 1999 unsere Gruppe zusammen, um die Mikrofossilien der Doushantuo-Formation zu studieren. Zum Team gehörten Chen und Chia-Wei Li, die mit als Erste über die Eier und Embryos berichtet hatten. Li ist Experte für Biomineralisation an der Staatsuniversität Tsing Hua. Chen hat durch seine Pionierarbeit an der unterkambrischen Chengjiang-Fauna umfassende Erfahrung.

Ersten Proben zufolge bot eine relativ dünne schwarze Sedimentschicht die besten Aussichten auf Erfolg. Aus anderen Gesteinslagen von dort hatten Forscher die phosphatisierten Mikrofossilien im Labor mit Säure freigelegt, was aber bei unserem Material misslang. Chens Labor in Nanjing, wohin unser Kipplaster unterwegs war, würde stattdessen so genannte Dünnschliffe anfertigen. Solche hauchdünnen Steinscheibchen sind fast durchsichtig und lassen sich daher, auf Glasträger montiert, unter dem Mikroskop durchmustern. Mehr als 10 000 solcher Präparate anzufertigen und sorgfältig zu analysieren ist eine gigantische Aufgabe. Sie erbrachte Myriaden von Eiern und Embryos, daneben winzige Schwämme und Nesseltiere. Aber gab es wirklich Bilaterier?

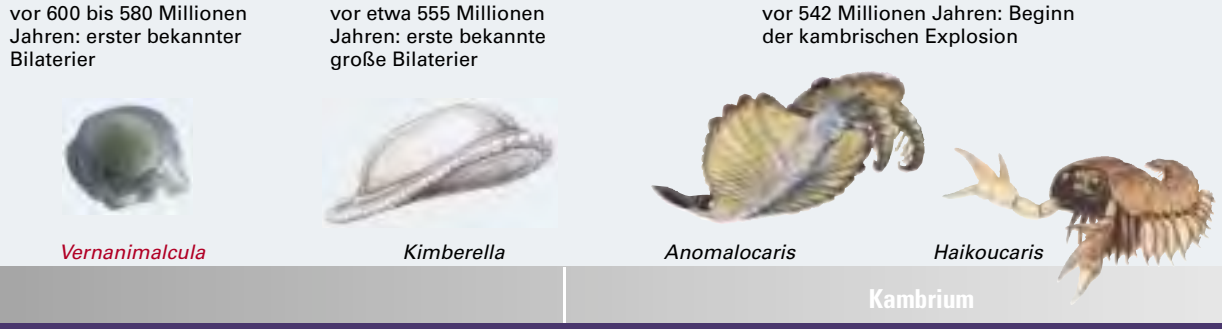
Im Sommer 2003 begannen wir uns auf einen besonders verdächtigen Typ von Mikrofossilien zu konzentrieren. In den 10 000 Dünnschliffpräparaten konnten wir zehn derartige Exemplare ausmachen. Anfang 2004, nach monatelangen Analysen, kamen wir zu dem Schluss: Dieses winzige Lebewesen trägt die wesentlichen Merkmale der Bilateria.

Nur zwischen 0,1 und 0,2 Millimetern dick, also nicht mehr als rund drei Kopfhaare breit, aber überraschend komplex sind diese Winzlinge – und im Körperbau geradezu das Paradebeispiel eines Bilateriers. Man erkennt drei, aus so genannten Keimblättern hervorgegangene Hauptgewebe (Bilder S. 71): eine Au-

denoberfläche. Einige Organismen starben höchstwahrscheinlich aus, als ihr Substrat zunehmend instabil wurde. Andere dagegen passten sich dieser neuen Umwelt an.

▶ Im Unterkambrium traten die ersten bekannten Beutegreifer auf (siehe den Beitrag S. 62). Mehrere neue Typen fanden sich in der 525 Jahre alten Chengjiang-Fauna in China, darunter Gliedertiere mit merkwürdigen Greiforganen wie *Haikoucaris*.

Diese biologischen Interaktionen spielten zwar eine wichtige Rolle bei der frühen Evolution der Tiere. Wie aber Charles Marshall von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) einwendet – und unsere Ergebnisse es stützen –, waren die genetische Grundausstattung und die für Bilateria typischen Mechanismen embryonaler Entwicklungsmuster bis zur kambrischen Explosion wahrscheinlich bereits etabliert. Daher handelte es sich bei der »Explosion« tierischer Bautypen genauer betrachtet um ein Aufblühen: um ein Ausnutzen neuer Bedingungen durch Tiere, die bereits die genetischen Werkzeuge entwickelt hatten, um Vorteile aus diesen neuartigen Lebensräumen zu schöpfen. Eine grundlegende Änderung in der genetischen Ausstattung hat zu diesem Zeitpunkt wohl nicht stattgefunden.



ßenschicht, einen Darm mit Mund und After sowie paarige Coelomhöhlen um den Darm (so genannte sekundäre Leibeshöhlen). Mit seinem ovalen Körper, der ein wenig an ein Mini-Weingummi erinnert, glitt das Tierchen vermutlich über den Meeresboden und schlürfte mit dem Mund wie ein Staubsauger Mikroben auf. Gruben beiderseits der Öffnung könnten Sinnesorgane gewesen sein.

Frühlingserwachen

Wir tauften unseren Fund *Vernanimalcula*, was Frühlingstierchen bedeutet. Der Name spielt auf die lange Eiszeit davor an, welche die Erde fast völlig mit Gletschern überzog und sie wie einen Schneeball aussehen ließ (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 58). Die Gesteine, die das Geschöpf bargen, sind nur wenig jünger als jene, welche die letzte Episode dieser gewaltigen Vereisung kennzeichnen.

Eine biologische Komplexität wie bei unserem Frühlingstierchen legt eine Entwicklung nahe, die lange vor der Zeit begann, in der es lebte. Schließlich konnte das Geschöpf dieses Ausmaß an Symmetrie und Komplexität nicht auf einen Schlag erworben haben. Für mögliche Hinweise auf seine Vorfahren müssen wir nun ältere Fossillagerstätten finden.

Und was geschah mit seinen Nachfahren? Wie das Leben in den 40 bis 55 Jahrmillionen bis zur kambrischen Explosion aussah, erschließt sich uns hauptsächlich aus der Ediacara-Fauna. Sie umfasst Abdrücke und Steinkerne von Weichkörpertieren, die bei einer Länge von wenigen Zentimetern bis zu einem Meter erheblich größer sind als *Vernanimalcula*. Neue Entdeckungen bestätigen die Existenz dieser Ediacara-Tiere schon vor 575 Millionen Jahren. Aber erst in Gesteinsproben, die 555 Millionen Jahre oder jünger sind, finden sich Fossilien, die offenbar Bilaterier darstellen. Man braucht für sie kein Mikroskop: *Kimberella* zum Beispiel war handtellergroß (siehe Kasten oben). Diese Meeresbewohnerin könnte eine Urform der Weichtiere gewesen sein, die heute hauptsächlich als Muscheln, Schnecken und Tintenfische den Ozean bevölkern.

Leider bietet keine uns bekannte Ediacara-Ablagerung eine mineralische Zusammensetzung, wie sie für die Erhaltung mikroskopisch kleiner Lebewesen erforderlich wäre. Ob damals winzige Nachfahren der älteren Mini-Bilaterier existierten, lässt sich daher nicht sagen.

Wie dem auch sei, unsere Fossilien zeigen etwas Wichtiges: dass Bilaterier komplexe Baupläne zu entwickeln vermochten, bevor sie große Körper hervorbringen konnten. Wissenschaftler spekulieren nun darüber, was zu der späteren Vergrößerung geführt haben mag. Die wahrscheinlichste Erklärung ist ein drastischer Anstieg des Sauerstoffsgehalts im Meer. Ein knappes Angebot an gelöstem Sauerstoff für die Zellen beschränkte die Körpergröße.

Unsere schon früher gehegte Vermutung, die Wurzeln komplexer Tiere reichten weit in die Vergangenheit zurück, hat sich durch die bisherige Arbeit jedenfalls erhärtet. Wir meinen daher, dass sich im Kambrium weniger eine Explosion als vielmehr ein Aufblühen des tierischen Lebens ereignet hat (siehe Kasten oben). ◁

David J. Bottjer, derzeit Professor für Geo- und Biowissenschaften an der Universität von Südkalifornien in Los Angeles, ist Paläobiologe mit Forschungsschwerpunkt auf der Entstehung und Entfaltung der frühen Tiere. Er arbeitet interdisziplinär mit Kollegen aus der Entwicklungsbiologie, Molekularbiologie, Informatik und Geochemie zusammen. Bis zum Herbst 2006 ist er Präsident der amerikanischen Paläontologischen Gesellschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Small bilaterian fossils from 40 to 55 million years before the Cambrian. Von Jun-Yuan Chen et al. in: Science, Bd. 305, S. 218, 2004

Life und a young planet: the first three billion years of evolution on earth. Von Andrew H. Knoll. Princeton University Press 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Lehren aus der Monsterwelle

Nach den Erfahrungen mit dem verheerenden Tsunami im Indischen Ozean vom Dezember 2004 sind die Wissenschaftler jetzt besser für die Vorhersage solch todbringender Wellen gerüstet.

Von Eric L. Geist, Vasily V. Titov und Costas E. Synolakis

Am 26. Dezember 2004 verwüsteten bis zu dreißig Meter hohe Wogen die Küsten rund um den Indischen Ozean. Sie entvölkerten ganze Städte und forderten innerhalb weniger Stunden über 225 000 Todesopfer – mehr als jeder andere jemals registrierte Tsunami zuvor. Mindestens eine Million Menschen wurden obdachlos.

Diese Katastrophe zeigte auf schreckliche Weise die steigende Bedrohung der immer dichter besiedelten Küstenregionen durch todbringende Überflutungen. Da der Tsunami zugleich der bislang am besten dokumentierte war, verhalf er aber auch zu einer Fülle neuer Einsichten, die dazu beitragen werden, solche Katastrophen in Zukunft zu vermeiden.

So konnten die Forscher erstmals ihre Computersimulationen testen, die Prognosen erstellen, wohin sich die Wassermassen bewegen und wie sie sich beim Auflaufen auf die Küste verhalten. Der Tsunami im Indischen Ozean machte überraschend deutlich, wie stark sich schon geringfügige Unterschiede im Verlauf eines Erdbebens auf Ausmaß und Form der resultierenden Flutwellen auswirken. Verbesserte Modelle, welche diese Erkenntnisse berücksichtigen, werden in Zukunft gemeinsam mit neuen Mess- und Frühwarnsystemen zur Rettung von Menschenleben beitragen.

Außerdem muss die Liste der gefährdeten Regionen erweitert werden: Dort,

Die bis dreißig Meter hohe Wasserwand, die im Dezember 2004 über die Küsten Südostasiens hereinbrach, verursachte eine der schlimmsten Naturkatastrophen aller Zeiten. Doch das Unglück half auch, Computermodelle und Vorhersagen von Tsunamis zu verbessern.

MATTHEW FREY / WOOD RONSAVILLE HARLIN, INC.

wo die Monsterwelle Ende 2004 ihren Ausgang nahm, hatte kaum jemand damit gerechnet. Wie die Geowissenschaftler schon länger wissen, ereignen sich fast alle Erdbeben, die einen Tsunami zur Folge haben, in Subduktionszonen – Regionen, die durch gewaltige Gräben am Meeresboden gekennzeichnet sind. Hier rücken zwei der tektonischen Platten, aus denen die Erdschale besteht, gegeneinander vor, wobei die eine unter die andere abtaucht. Gravitationskräfte und die Umwälzung zähflüssigen Materials tief im Inneren des Erdmantels treiben diese Bewegung an.

An der Grenzfläche zwischen den beiden Platten kommt es zu erheblicher Reibung. Die riesigen Gesteinsblöcke fressen sich deshalb manchmal regelrecht fest. In diesem Fall baut sich ein enormer Druck auf. Wenn der Widerstand schließlich bricht, entlädt sich die Spannung in Form eines Erdbebens. Die verhakte obere Platte schnellt dann ruckartig schräg aufwärts – und drückt an ihrem Rand das darüber liegende Meerwasser empor. So entsteht ein lang gezogener Wasserberg, der sofort nach beiden Seiten auseinander läuft. Die Stärke des dadurch ausgelösten Tsunamis hängt davon ab, wie groß das Stück ist, um das die Blöcke gegeneinander verrutscht sind.

Im östlichen Indischen Ozean schiebt sich entlang einer Subduktionszone vor der Westküste der indonesischen Insel Sumatra die Indische unter die Eurasische Platte. Im südlichen Abschnitt dieser Störungslinie traten schon in der Vergangenheit heftige Erdstöße ▷

▷ auf, zuletzt 1833. Kerry Sieh vom California Institute of Technology in Pasadena und seine Kollegen hatten das bereits vor einigen Jahren aus geologischen Kartierungen von Korallenriffen abgeleitet, die bei diesen Erschütterungen angehoben worden waren. Die Experten erwarteten das nächste starke Beben deshalb in diesem Bereich.

Stattdessen fand der Erdstoß, der den Tsunami vom Dezember 2004 auslöste, im nördlichen Abschnitt der Subduktionszone statt, also nordwestlich von Sumatra nahe der Inselgruppe der Andamanen. Früheren Untersuchungen zufolge gleiten die Indische und die Eurasische Platte hier sehr viel langsamer übereinander. Daher schien es unwahrscheinlich, dass sich jemals genügend Spannung aufbauen könnte, um ein Beben der Stärke 9,0 auszulösen. Tatsächlich brach bei der Erschütterung, wie die spätere Analyse ergab, die Störungslinie in einem Gebiet von der Größe Kaliforniens auf, wobei sich ein 1200 Kilometer langer Abschnitt des Meeresbodens um bis zu acht Meter hob. Hunderte von Kubikkilometern Meerwasser wurden so verdrängt. Nach dieser bösen Überraschung halten Forscher jetzt auch Tsunamis an ähnlichen Subduktionszonen vor Alaska, Puerto Rico und anderen Regionen für möglich (siehe Kasten auf der rechten Seite).

Das Sumatra-Andamanen-Erdbeben begann um 7.59 Uhr Ortszeit. Binnen Kurzem registrierte ein weltweites Netz seismischer Stationen das Ereignis und meldete es auch an das Pacific Tsunami Warning Center in Ewa Beach (Hawaii). Obwohl die dortigen Geophysiker zu den ersten Menschen außerhalb der betroffenen Region zählten, die von dem Erdstoß erfuhren, ahnten sie nicht, dass ein Tsunami quer über den Indischen Ozean raste. Die Nachricht von der sich anbahnenden Katastrophe erreichte sie wie alle anderen erst per Radio und Fernsehen.

Im Pazifik, wo 85 Prozent aller Tsunamis auftreten, können Drucksensoren am Meeresboden die Welle schon vor dem Eintreffen an der Küste aufspüren und die Wissenschaftler auf Hawaii sowie in einem weiteren Vorwarnzentrum in Palmer (Alaska) alarmieren (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 40). Im Indischen Ozean gab es nichts dergleichen. Auch fehlten schnelle Kommunikationswege, um Warnungen an die Bewohner der Küstenregionen weiterzuleiten. Obwohl die ersten Wellen mindestens zwei Stunden benötigten, bevor sie Thailand, Sri Lanka und viele andere der am stärksten betroffenen Gebiete erreichten, waren die Menschen dort ahnungslos.

GETTY IMAGES / AFP / JIMIN LAI

Testfall für Computermodelle

Jener 26. Dezember 2004 machte der Welt jäh bewusst, welch unermessliche Schäden Tsunamis anrichten können, wo sie überall drohen und wie wehrlos die Betroffenen dagegen sind. Politik und Wissenschaft haben seither große Anstrengungen unternommen, Lehren aus dem Geschehen zu ziehen. Forscher arbeiten sich durch die Fülle an Informationen, die über die Katastrophe vorliegen. So hoffen sie Genaueres darüber zu erfahren, wie Tsunamis entstehen, sich ausbreiten und beim Anrollen gegen die Küsten ihre Energie freisetzen. Vor allem aber soll die Auswertung der Daten helfen, vor der nächsten solchen Flutwelle rechtzeitig zu warnen.

Seit 15 Jahren entwickeln Wissenschaftler in Japan und den USA Computermodelle, welche die Ausbreitung eines Tsunamis auf hoher See simulieren. Bis vor Kurzem verfügten sie dabei nur über wenige Beobachtungen, um die Realitätsnähe ihrer Ergebnisse zu testen. In alle Tsunamimodelle gehen die Lage und die Ausdehnung des deformierten Meeresbodens ein. Diese Parameter ergeben sich näherungsweise aus dem Epizentrum und der Magnitude des zu Grunde liegenden Erdbebens. Eine weitere wichtige Ausgangsgröße ist die Höhe der verdrängten Wassermasse. Dieser Parameter lässt sich für Echtzeitvorhersagen aber erst genau genug ermitteln, wenn direkte Beobachtungen der Wellen auf hoher See vorliegen.

Bei früheren bedeutenden Tsunamis gab es lediglich Aufzeichnungen von Gezeitenpegeln in Küstennähe und nachträgliche Schätzungen der Wellenamplitude auf Grund der an Land entstandenen Schäden. Das Problem dabei ist, dass die tatsächliche Höhe der anbrandenden Wasserwoge am Strand durch zusätzliche Wellen verschleiert wird. Sie entstehen, wenn der Tsunami von Dämmen abprallt, Inseln umrundet oder in einer Bucht hin- und herschwappt. All das verfälscht das Signal.

Bei dem jüngsten Tsunami im Indischen Ozean wollte es nun der Zufall,

IN KÜRZE

- Der **katastrophale Tsunami** vom Dezember 2004 im Indischen Ozean lieferte eine Fülle neuer Erkenntnisse über die Monsterwellen.
- Dank der dabei gewonnen Daten lässt sich jetzt genauer vorhersagen, wo ein Tsunami entstehen könnte, **wohin die tödlichen Wogen laufen** und wie weit sie die betroffenen Küsten überfluten werden.
- In Verbindung mit neuen Beobachtungs- und Warnsystemen sollten die verbesserten **Computermodelle** helfen, künftig Menschenleben zu retten.

Verbogene Schienen in der Nähe des Ortes Telwatta an der Westküste Sri Lankas zeugen von der Gewalt des Tsunamis. Hier warfen die Fluten einen Personenzug mit acht Wagen vom Gleis und rissen mindestens tausend Menschen in den Tod.

dass drei Erdbeobachtungssatelliten den Modellforschern die ursprünglichen, ungestörten Wellenhöhen lieferten. Die Späher im All überquerten auf ihrer Umlaufbahn zwei bis neun Stunden nach dem Erdbeben die Region und machten die ersten Radarmessungen eines Tsunamis auf seinem Weg über das offene Meer. Die Ergebnisse bewiesen, was die Forscher schon länger vermutet hatten: dass eine Wasserbeule, die auf hoher See relativ flach ist – in diesem Fall war sie nur einen halben Meter hoch –, sich tatsächlich zu der gewaltigen Woge auftürmen kann, die an Land schlimmste Zerstörungen anrichtet.

Da sich die Satelliten bewegten – mit einer Bodengeschwindigkeit von etwa 5,8 Kilometern pro Sekunde –, lieferten sie einen kontinuierlichen Satz von Wellenamplituden längs ihrer projizierten Flugbahn. Einen solchen ununterbrochenen »Transekt« von Tsunamiwogen hatte es bis dahin nicht gegeben, denn Gezeitenpegel registrieren nur den Wasserstand an einer einzelnen Stelle.

Eine Welle, die um die Welt raste

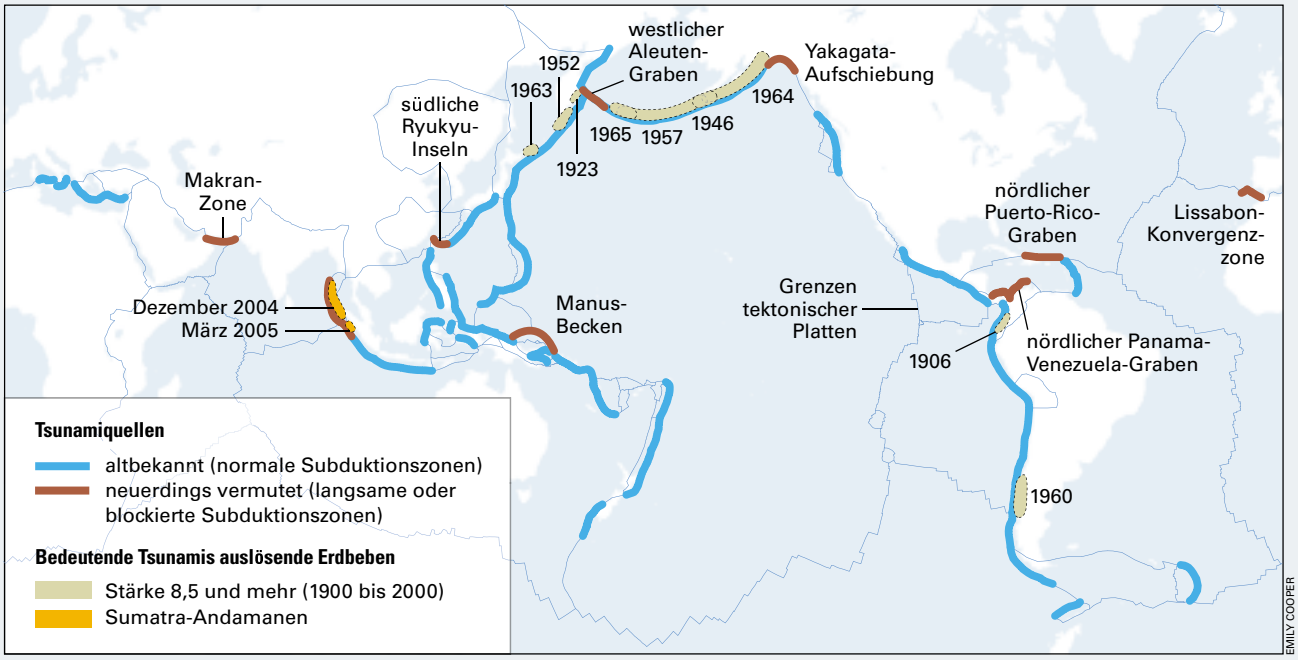
Wie sich zeigte, stimmten die gemessenen Wellenhöhen ziemlich gut mit den Ergebnissen der Computersimulation überein (siehe Kasten auf S. 78). Demnach ist die theoretische Beschreibung der Bewegung von Tsunamis auf hoher See im Wesentlichen korrekt. Zugleich hat sich das Rechnermodell als verlässliches Element zur Planung von Maßnahmen für den Katastrophenschutz selbst bei den größten denkbaren Flutwellen erwiesen.

Tsunamis bewegen sich im tiefen Ozean etwa mit der Geschwindigkeit eines Düsenflugzeugs, legen also 500 bis 1000 Kilometer pro Stunde zurück. Deshalb benötigte die erste Welle an jenem 26. Dezember 2004 weniger als drei Stunden, um von Nordsumatra und den Andamanen in östlicher Richtung nach Myanmar (Birma), Thailand und Malaysia und nach Westen bis Sri Lanka, Indien und zu den Malediven zu gelangen. Nach nur elf Stunden hatte die Woge die 8000 Kilometer lange Strecke zur südafrikanischen Küste zurückgelegt – dem fernsten Punkt, wo sie noch Menschenleben forderte.

Dort machte der Tsunami aber keineswegs Halt. Während die Medien immer neue Horrornachrichten über das Ausmaß der Tragödie verbreiteten, trafen bei den Wissenschaftlern erste Aufzeichnungen von Gezeitenpegelstationen rund ▷

Neubewertung des Tsunamirisikos

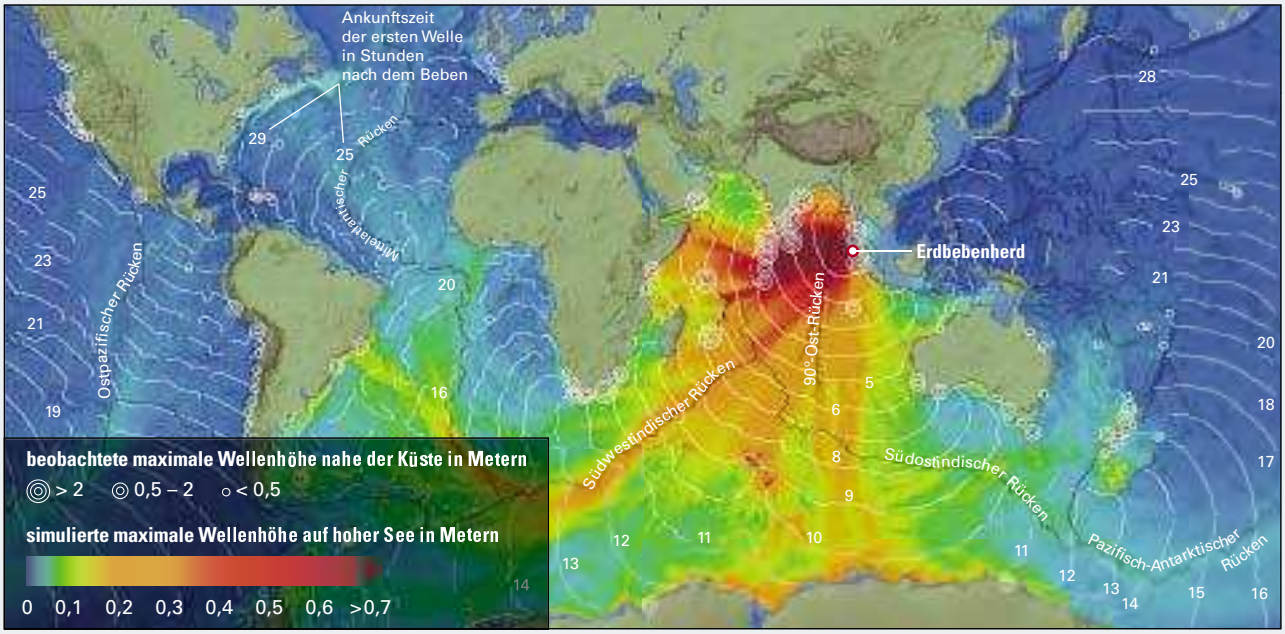
Alle Erdbeben, die im letzten Jahrhundert größere Tsunamis auslösten (khakifarbene Ovale), ereigneten sich an so genannten Subduktionszonen (blaue Linien), wo zwei tektonische Platten aufeinander stoßen und die eine sich über die andere schiebt. Falls das ruckartig geschieht, wird das Meerwasser zu Tsunamiwellen aufgewölbt. In demjenigen Teil der Sumatra-Andamanen-Verwerfung, von dem die jüngste Flutkatastrophe im Indischen Ozean ausging, waren noch nie Erdstöße mit Magnituden über 8 registriert worden. Nachdem dort im Dezember 2004 ein Beben der Stärke 9 stattfand und drei Monate später eine fast ebenso heftige Erschütterung folgte (orange Ovale), gelten jetzt auch ähnliche, sich langsam bewegende Verwerfungen anderswo als mögliche Auslöser von Tsunamis (rote Linien). Bei einigen davon existieren große Strukturen auf dem Meeresboden, die vielleicht die Subduktion blockieren und so die Spannung an der Plattengrenze erhöhen.



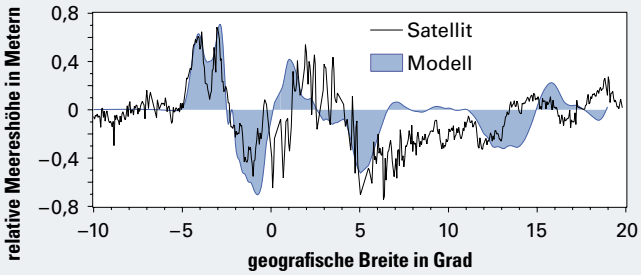
Vorhersage des Verhaltens von Tsunamis

Die Beobachtungen bei der Flutkatastrophe vom Dezember 2004 bestätigten die Vorstellungen der Wissenschaftler, was die Reichweite von Tsunamis (oben), ihre Form im offenen Meer (unten links), die Höhe der Wellen an der Küste und die Größe des Überflutungsareals (unten rechts) angeht.

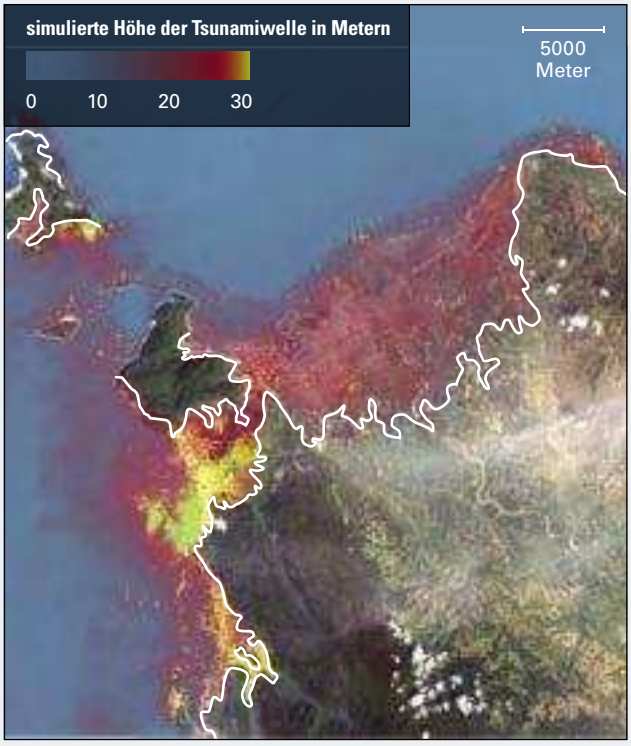
Auf jeder der hier gezeigten Grafiken werden die tatsächlich gemessenen Werte mit den Vorhersagen des Rechnermodells der National Oceanic and Atmospheric Administration der USA verglichen, das als führendes amerikanisches Computerprogramm zur Simulation von Tsunamis gilt.



Der Blick auf das Ausbreitungsmuster des Tsunamis rund um den Globus zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den höchsten Wellen im offenen Meer, die sich aus der Simulation ergaben (rötliche Farben), und den höchsten Wasserständen, die Gezeitenpegel in Küstennähe gemessen haben (größte Kreise). Die erste Welle (weiße Linien) erreichte nach fast dreißig Stunden sowohl die Ost- als auch die Westküste Kanadas.



Der Satellit Jason-1 maß bei seinem Flug über den Indischen Ozean zwei Stunden nach dem Erdbeben, das den Tsunami auslöste, die Wellenhöhen im offenen Meer (schwarze Kurve). Die Werte stimmen unerwartet gut mit den Ergebnissen einer Simulation (blau) überein. Spitzen repräsentieren Wellenkämme, Ausschläge nach unten Täler.



VASILY V. TITOV

Die erste Tsunamiwelle erreichte in der Provinz Aceh im Norden Sumatras stellenweise Höhen von dreißig Metern und rauschte bis zu 4,5 Kilometer weit landeinwärts. Die Gebiete, für die das Computermodell eine Überflutung prognostizierte (überlagerte Farbgrafik), decken sich weit gehend mit den tatsächlich überschwemmten Arealen, die auf Satellitenbildern zu sehen sind und nachträglich kartiert wurden (Gebiete meerwärts von der weißen Linie).

▷ um den Globus ein. Demnach umkurvte der Tsunami auf seinem Weg Richtung Westen die Südspitze Afrikas und rauschte weiter nordwärts durch den Atlantik. Ausläufer erreichten nicht nur Brasilien, sondern selbst noch die Provinz Nova Scotia im Norden Kanadas. In Richtung Osten rollte die Flutwelle durch die Lücke zwischen Australien und der Antarktis in den Pazifik und drang dort gleichfalls bis nach Kanada vor. Seit dem Ausbruch des Krakatau-Vulkans im Jahr 1883 hatte es keinen Tsunami gegeben, der sich so weit ausbreitete.

Als das führende Tsunamimodell an der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) den gesamten Weg der Wasserwoge nachvollzog, konnte es die Messwerte an den verschiedenen Gezeitenpegelstationen ziemlich genau reproduzieren. Aber nicht nur das: Die Simulation machte auch verständlich, wie eine Tsunamiwoge derart große Strecken zurücklegen kann. Eine Karte der berechneten Wellenhöhen im Indischen Ozean zeigte nämlich eine Zunahme der Amplitude an mittelozeanischen Rücken. Diese lang gestreckten vulkanischen Erhebungen scheinen die Wellenenergie zu bündeln und in bestimmte Richtungen zu lenken, was die Reichweite des Tsunamis erhöht. Die Kenntnis dieses Effekts sollte die Genauigkeit künftiger Vorhersagen erhöhen.

Wie die Woge zur Wasserwand wird

Weitaus schwerer als die Ausbreitung der Riesenwoge im offenen Meer ist allerdings ihr Verhalten beim Auftreffen auf die Küste zu simulieren. Sobald die Wellen in flacheres Wasser gelangen, werden sie abgebremst, und der Abstand zwischen den Kämmen verringert sich von mehreren hundert auf fünfzehn bis zwanzig Kilometer. Da aber von hinten weiteres Wasser mit höherer Geschwindigkeit nachdrängt, wachsen die Wellenberge in die Höhe.

So war es auch im Dezember 2004. Die Flutwelle erreichte in der Provinz Aceh auf Sumatra, wo sie als Erstes eintraf, stellenweise über dreißig Meter Höhe. Immer noch rund dreißig bis vierzig Kilometer pro Stunde schnell, schwappte sie landeinwärts – in Teilen der Stadt Banda Aceh mehr als vier Kilometer weit (siehe Kasten links). Das Wasser wich fast genauso rasch zurück und zog dabei alles, was es auf dem Weg ins Land mitgerissen hatte, aufs Meer hinaus. Weitere Wellen folgten in den nächsten Stunden. Da zwischen dem Eintreffen der einzelnen Kämme dreißig Minuten und mehr vergingen, kehrten viele Menschen ahnungslos an die Strände zurück, um nach verlorenen Angehörigen oder Habseligkeiten zu suchen, und wurden von den nachfolgenden Wogen erfasst. Die Schäden an den Küstenstrichen waren mannigfaltig und so ausgedehnt, dass selbst Astronauten im All sie feststellen konnten.

Angesichts der vielen beteiligten Faktoren und der unterschiedlichen Effekte mag man erahnen, wie schwierig die Simulation dieser Vorgänge ist. Bis in die frühen 1990er Jahre hinein stoppten selbst die besten Computermodelle wegen der Komplexität der Aufgabe an der Küstenlinie oder kurz davor. Anhand der letzten berechneten Wellenhöhe schätzten die Forscher dann, wie weit landeinwärts die Woge schwappen würde. Wie die ersten genauen Auswertungen von Tsunamikatastrophen ergaben, lagen sie dabei jedoch weit daneben. So erreichte die Überflutung bei einem Tsunami, der 1992 Nicaragua erfasste, mancherorts zehnmal so hoch gelegene Stellen wie anhand der Modelle geschätzt.

In der Folgezeit wetteiferten amerikanische und japanische Forscher darin, das Verhalten der Monsterwellen an Land in die Simulationen einzubeziehen, um genauer vorhersagen zu können, wie weit das Wasser steigen würde. Durch eine Kombination großräumiger Experimente im Labor und Vor-Ort-Messungen bei späteren Flutkatastrophen gelang es, sowohl das japanische Modell »Tunami-N2« als auch das amerikanische »Most« so zu verfeinern, dass die Überschwemmungsmuster der meisten früheren Tsunamis recht gut reproduziert wurden. Allerdings mussten hoch aufgelöste Daten über die Topografie der Küste und des angrenzenden Meeres vorliegen. Unklar blieb außerdem, ob die Modelle auch auf die größten denkbaren Tsunamis anwendbar wären. Die Flutkatastrophe im Indischen Ozean bildete hier den ersten Testfall. Die Modelle bestanden die Nagelprobe besser als erwartet, obwohl die Topografie der Küstenlandschaft vielfach nicht sehr genau bekannt war.

Den Wasserstand der Flut zu kennen, reicht aber oft nicht aus, das Ausmaß der Zerstörungen durch den Tsunami vorherzusagen. Das zeigte sich bei der Begutachtung der Schäden nach den ▷

▷ Überschwemmungen in Indonesien und anderswo. An vielen Orten in Thailand sowie auf Sri Lanka und den Malediven war die Woge an Land weniger als fünf Meter hoch. Dennoch richtete sie fast genauso schwere Verwüstungen an wie auf Sumatra, wo das Wasser teils sechsmal so hoch stand. Eine weitere böse Überraschung war, dass die Wellen in Banda Aceh reihenweise Stahlbetonbauten niederrissen, die modernen Konstruktionsstandards entsprachen und die Erschütterung durch das Erdbeben allein überstanden hätten.

Damit sich das Ausmaß der Zerstörung besser voraussehen lässt, arbeiten Ahmet C. Yalciner von der Technischen Universität Mittelost in Ankara (Türkei) und einer von uns (Synolakis) an neuen Schadensmaßen. Darin ist auch berücksichtigt, dass die Strömungsgeschwindigkeit bei Tsunamis sehr viel höher ist als bei normalen Gezeiten- und Sturmwellen. Küsteningenieure können so abschätzen, welche Kräfte die Monsterwellen auf Bauwerke ausüben.

Erdbeben mit Verzögerungseffekt

Wohl das größte wissenschaftliche Rätsel, das der Tsunami im Indischen Ozean aufgab, war allerdings das Erdbeben selbst. Sogar seine Stärke steht immer noch nicht genau fest – Schätzungen reichen bis 9,3. In jedem Fall war es eine der heftigsten seismischen Erschütterungen, die moderne Instrumente jemals aufgezeichnet haben. Trotzdem hätte von der Sumatra-Andamanen-Verwerfung eigentlich kein derart riesiger Tsunami ausgehen dürfen. Wie kam es dazu?

Das Erdbeben fiel in vieler Hinsicht aus dem Rahmen. In der Regel ist die Rutschung entlang der Plattengrenzfläche gleich zu Beginn am größten, wenn der Widerstand nachgibt und die Störungslinie aufbricht. Manchmal aber läuft der Vorgang in zwei Schritten ab. Zunächst bildet sich nur ein kleiner Riss mit geringem Versatz, was ein schwaches Beben vermuten lässt. Dann aber erreicht der Sprung im Boden einen schwachen oder stark unter Spannung stehenden Abschnitt der Störungslinie, der dadurch gewaltsam aufbricht. So

Das deutsche Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean

Sensornetze sollen ab 2008 eine Tsunamiwarnung spätestens zehn Minuten nach dem auslösenden Erdbeben ermöglichen.

Von Jörn Lauterjung und Ernst R. Flueh

Die Tsunamikatastrophe vom 26. 12. 2004 traf die Anrainerstaaten des Indischen Ozeans völlig unvorbereitet. Zwar wurden die ersten Meldungen über den ungefähren Ort des verheerenden Erdbebens schon nach zwölf Minuten im Internet veröffentlicht. Genauere Daten fehlten jedoch, weil keine Erdbebenstationen in der Nähe online verfügbar waren. Nach nicht einmal zwanzig Minuten erreichte die erste Tsunamiwelle bereits den Strand von Banda Aceh im Norden Sumatras. Aber auch, als die Woge nach etwa 1,5 Stunden Thailand und nach rund zwei Stunden Sri Lanka heimsuchte, waren noch keine verlässlichen Meldungen an die zuständigen Stellen übermittelt. Und was an Informationen vorlag, blieb letztlich nutzlos, weil es keine Handlungsoptionen, Anweisungen und Evakuierungspläne für einen solchen Katastrophenfall gab.

Um ein ähnliches Desaster für die Zukunft zu vermeiden, präsentierte wenige Tage nach dem Ereignis bereits ein Konsortium deutscher Forschungseinrichtungen unter Federführung des GeoForschungsZentrums Potsdam ein Konzept zur Einrichtung eines Frühwarnsystems im Indischen Ozean. Als Kern sieht es ein dichtes Netz von Seismometern in Indonesien vor, an dessen Südküste sich der so genannte Sundabogen entlangzieht: jene von Bangladesch bis Neuguinea reichende seismisch aktive Zone, von der das größte Tsunamirisiko im Indischen Ozean ausgeht. Die Seismometer sollen so positioniert werden, dass ein Erdbeben, wo immer es dort auftritt, innerhalb von zwei Minuten an mindestens drei Stationen registriert wird und sich somit sehr schnell exakt lokalisieren und auf der Magnitudenskala einordnen lässt. An der Realisierung dieses Überwachungssystems beteiligen sich neben Deutschland und Indonesien auch Japan und China. Die ersten vier deutschen Stationen wurden 2005 installiert, bis 2008 werden weitere zwanzig folgen.

Damit ein Seebeben einen Tsunami auslöst, muss sich der tiefe Erdbebenriss bis an den Meeresboden fortsetzen, sodass dieser sich merklich hebt. Erst dadurch kann Energie auf die Wassersäule übergehen und zu einer Aufwölbung der Meeresoberfläche führen. Diese Beule beginnt dann, angetrieben durch die Schwerkraft, durch den Ozean zu laufen. Im Unterschied zu einer Oberflächenwelle erfasst sie dabei die gesamte Wassersäule. Ihre Geschwindigkeit hängt deshalb von der Wassertiefe ab und beträgt in 6000 Meter tiefem Wasser rund 800 Kilometer pro Stunde. Tsunamiwellen haben eine sehr große Wellenlänge von etwa 200 Kilometern und sind nur wenige Zentimeter bis Dezimeter hoch. Im Indischen Ozean registrierten Satelliten im Dezember 2004 südlich von Sri Lanka eine maximale Höhe von sechzig Zentimetern.

Um Fehlalarme aus dem bloßen Erdbebenmonitoring zu vermeiden, muss der Tsunami selbst im Ozean aufgespürt werden. Dies gelingt mit Drucksensoren am Meeresboden, die den Durchgang einer nur wenige Zentimeter hohen Tsunamiwelle sehr präzise messen können. Sie senden ihre Signale an Bojen an der Wasseroberfläche. Diese ermitteln über das Globale Positionsbestimmungssystem (GPS) zugleich Seegangsdaten, aus denen sich ebenfalls eine extrem langwellige Woge herausfiltern lässt. Die Drucksensoren sind so längs des Sundabogens verteilt, dass jeder denkbare Tsunami von mindestens einer von ihnen nach spätestens sechs Minuten registriert wird.

Die ersten beiden Bojensysteme wurden im November 2005 vor der Küste Sumatras ausgebracht. Acht weitere sollen noch folgen. Zudem werden auf einigen Inseln Küstenpegel aufgebaut.

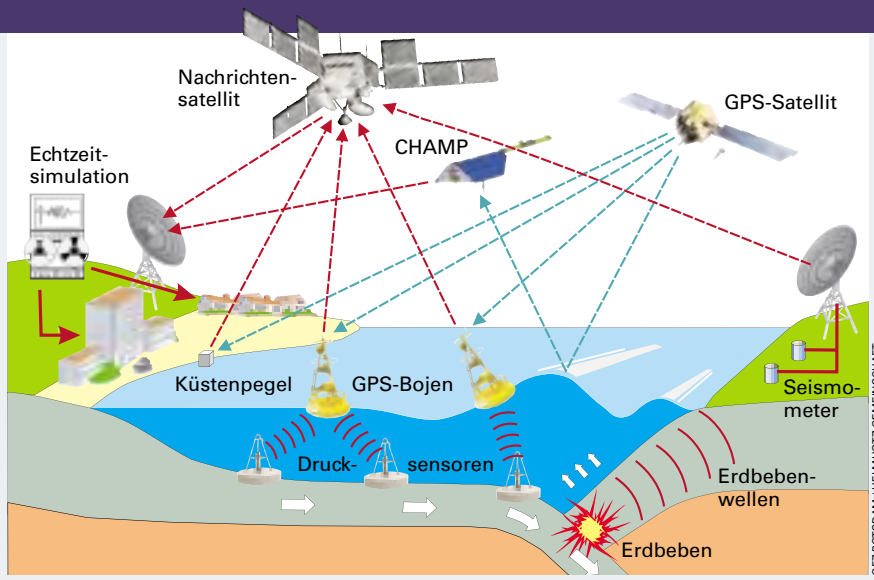
kommt es nachträglich zu einer viel stärkeren Erschütterung und eventuell einem Tsunami. Genau das geschah im Dezember 2004. Derartige Fälle rechtzeitig zu erkennen, um noch eine Warnung herausgeben zu können, ist besonders schwierig.

Die Tsunami-Vorhersagemodelle der NOAA hatten mit diesem komplizierten Auslösemechanismus ihre Probleme. Auf Grund der seismischen Daten allein unterschätzten sie die Wellenhöhe im offenen Ozean um den Faktor zehn und mehr. Zwar verbesserten sich die Ergebnisse deutlich, als die erste direkt gemessene Tsunami-Amplitude eingegeben wurde, die von einer Gezeitenpegelstation auf den Kokosinseln im Indischen Ozean stammte und die Wissenschaftler ungefähr viereinhalb Stunden nach dem Erdbeben erreichte. Doch irgendetwas stimmte immer noch nicht.

In den Tagen nach dem Erdstoß ergaben genaue Analysen der seismischen Wellen, dass sich der anfängliche Riss wie ein Spalt im Eis eines zugefrorenen Sees von Sumatra nach Norden ausgedehnt hatte – mit Geschwindigkeiten bis 2,5 Kilometer pro Sekunde. Auch die Stellen mit dem größten Versatz, die hauptsächlich zum Tsunami beigetragen hatten, ließen sich identifizieren. Dennoch reichte die seismisch ermittelte Gesamtbewegung entlang der Störungslinie nicht aus, mit den Tsunamimodellen die von den Satelliten beobachteten Wellenhöhen im freien Meer oder die gewaltige Flut in Banda Aceh zu reproduzieren.

Der entscheidende Hinweis kam von Stationen an Land, die mit dem Globalen Positionsbestimmungssystem (GPS) auch Bodenbewegungen aufspüren, welche nicht schnell genug sind, um Erdbebenwellen zu erzeugen. Demnach folgte auf den anfänglichen großen Ruck eine langsamere Scherung, bei der keine seismische Energie mehr abgegeben wurde. Zwar darf die Rutschgeschwindigkeit nicht zu gering werden, damit noch ein Tsunami erzeugt wird. Dennoch erklärt dieses nachträgliche Gleiten (after-slip) wahrscheinlich die erstaunlichen Höhen der Tsunamiwellen. Wenn das stimmt, könnten in Zukunft fortlaufend ermit- ▷

ALEXANDER RUDLOFF



GFZ POTSDAM / HELMHOTZ GEMEINSCHAFT

Das deutsche Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean besteht aus verschiedenartigen Messgeräten am Meeresboden, an der Wasseroberfläche und an Land, deren Daten in einer zentralen Kontrollstation zusammenlaufen und dort ausgewertet werden (rechts). Die erste von zehn Bojen, die per GPS den Wasserstand überwachen, wurde vergangenen November vom Forschungsschiff »Sonne« ausgesetzt (links).

Alle Daten laufen per Satellit in einem Frühwarnzentrum in Jakarta zusammen. Dort werden vorab schon Simulationen für unterschiedliche Erdbebenorte am Sundagraben sowie für vielerlei Magnituden und Risslängen durchgeführt. Gibt das Überwachungssystem dann Tsunami-Alarm, lassen sich anhand der Simulation, die zu den gemessenen Parametern – Herd und Charakteristik des Bebens sowie Wellenhöhe im tiefen Ozean – am besten passt, die gefährdeten Küstenabschnitte ermitteln.

Im Datenzentrum werden diese Ergebnisse über ein Geoinformationssystem mit weiteren Daten wie Evakuierungskarten, Informationen über Bevölkerungsdichten und kritische Infrastrukturen kombiniert. Nach etwa zehn Minuten liegt so ein Dossier vor, das als Grundlage für Warnmeldungen dient.

Die Installation der Sensornetzwerke und des Datenzentrums soll bis 2008 abgeschlossen sein. Alle deutschen Aktivitäten sind mit dem Intergovernmental Oceanographic Committee der Unesco abgestimmt, das im Januar 2005 von der UN den Auftrag erhielt, die Frühwarnmaßnahmen in den Anrainerstaaten des Indischen Ozeans zu koordinieren.

Jörn Lauterjung vom GeoForschungsZentrum Potsdam ist Projektmanager für das deutsche Tsunami-Frühwarnsystem. **Ernst R. Flueh** leitet am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften in Kiel den Bau der Drucksonden und die Installationsfahrten. Weitere Partner im deutschen Projekt sind das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln, das GKSS Forschungszentrum in Geesthacht, das Konsortium Deutscher Meeresforschung in Berlin, die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit in Eschborn, die United Nations University, Institute for Environmental and Human Security in Bonn und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

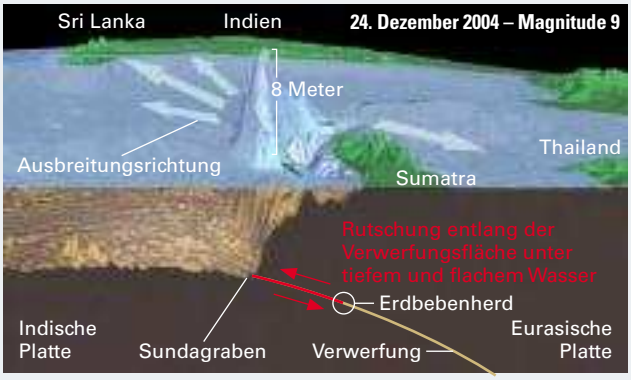
Kleine, aber entscheidende Unterschiede

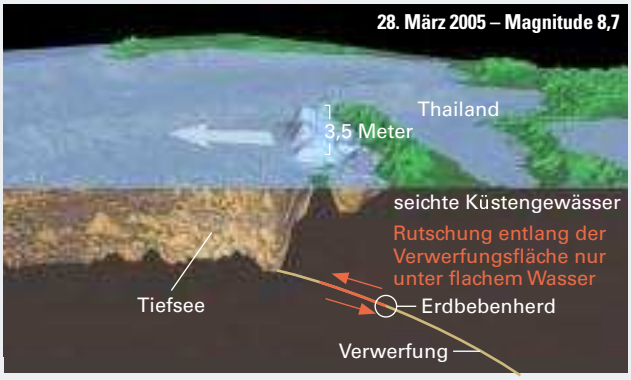
Am 28. März 2005, drei Monate nach dem Erdstoß vom Dezember 2004, ereignete sich ein zweites starkes Beben an derselben Verwerfung. Anfangs befürchteten viele Experten, dass der resultierende Tsunami ähnlich verheerend sein könnte. Doch er blieb relativ harmlos. So war die ursprüngliche Welle am Ort des Bebens nur 3,5 Meter hoch – gegenüber acht Metern im Dezember. (Die Wellenhöhe wurde in den Diagrammen unten stark übertrieben.) Detaillierte Untersuchungen ergaben vier Hauptgründe für diesen Unterschied.

Das Erdbeben vom März setzte bei einer Stärke von 8,7 nur knapp sieben Prozent der seismischen Energie seines Vorgängers frei, dessen Magnitude 9,0 betragen hatte. Außerdem ging es von einer tieferen Stelle an der Grenzfläche zwischen der Indischen und der Eurasischen Platte aus. Dadurch gelangte weniger Energie bis zum Meeresboden und in die Wassersäule darüber.

Ferner lag der Bebenherd an einer Stelle, wo das Meer flacher war. Deshalb wurde ein geringeres Wasservolumen angehoben als im Dezember, als die aufbrechende Verwerfungszone bis in den tiefen Sundagraben hineinreichte.

Schließlich fand der Erdstoß im März etwa hundert Kilometer weiter südlich statt, weshalb die nach Osten laufende Wellenfront fast zur Gänze auf Sumatra traf, das Thailand und Malaysia abschirmte. Nach Westen nahmen die Wogen Kurs auf das offene Meer, während sie sich im Dezember hauptsächlich Richtung Sri Lanka und Indien ausgebreitet hatten.





ERIC L. GEIST

▷ telte GPS-Daten wichtiger Bestandteil eines Frühwarnsystems sein.

Vorhersagen sind auch deshalb so schwierig, weil Besonderheiten des jeweiligen Erdbebens eine schwer fassbare Rolle spielen können. Wie um das zu bestätigen, kam es am 28. März 2005 zu einer weiteren starken Erschütterung an derselben Störungslinie. Anfangs brach die Plattengrenze in ähnlichem Abstand zur Küste Sumatras und in etwa derselben Tiefe unter dem Meeresboden auf wie beim Beben vom Dezember. Auch dieser Erdstoß zählte zu den zehn stärksten, die seit 1900 aufgezeichnet wurden. Doch danach war alles ganz anders.

Als auf den Bildschirmen am Pacific Tsunami Warning Center und anderswo die Zahl 8,7 für die Stärke des März-Bebens erschien, rechneten die Wissenschaftler mit dem Schlimmsten. Tatsächlich entstanden schwere Schäden durch starke Bodenerschütterungen. Doch blieben Nachrichten über Zerstörungen durch einen Tsunami zum allgemeinen Erstaunen aus.

Ein internationales Forschungsteam, dem einer von uns (Titov) angehörte, inspizierte die Region zwei Wochen später. Dabei maß es Auflaufhöhen eines Tsunamis von bis zu vier Metern – die immer noch potenziell tödlich sind. Einige Indonesier sagten, sie hätten aus der Katastrophe vom Dezember gelernt und seien landeinwärts gerannt, als der Boden zitterte. Doch das konnte nicht der Hauptgrund dafür sein, dass der März-Tsunami viel glimpflicher ablief.

Die nachträgliche genaue Analyse zeigte kleine, aber wichtige Unterschiede. Einer davon war, dass der Bebenherd diesmal unter den Inseln Nias und Simeuluë lag. An dieser Stelle konnte deshalb kein Wasser verdrängt werden. Weitere Unterschiede sind im obigen Kasten aufgeführt.

Den verbliebenen wissenschaftlichen Ungewissheiten zum Trotz, die bei derart komplexen Phänomenen wohl unvermeidlich sind, fühlen sich die Tsunamiforscher nach den Erfahrungen der Katastrophe vom Dezember 2004 gerüstet für den nächsten Ernstfall. Die wichtigste Aufgabe ist es nun, die neuen Erkenntnisse umzusetzen und für die Aufklärung der Bevölkerung, die Katastrophenplanung und die Vorwarnung zu nutzen. ◁

Eric L. Geist (oben) untersucht als Geophysiker beim Geologischen Dienst der USA in Menlo Park (Kalifornien) mit Computersimulationen den Zusammenhang zwischen Erdbeben und Tsunamis. **Vasily V. Titov** ist leitender Mitarbeiter beim Tsunami-Forschungsprogramm der National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) in Seattle (Washington) und Dozent an der dortigen Universität. Er hat das erste Computermodell der NOAA für die Vorhersage von Tsunamis entwickelt. **Costas E. Synolakis** leitet das Tsunami-Forschungszentrum an der Universität von Südkalifornien in Los Angeles, das er 1995 gegründet hat.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Tsunami – eine Welle erschüttert die Welt (Audio-CD). Von Dierk Heimann und Wolfram Giese. medi cine, 2005

Tsunamis – case studies and recent developments. Von Kenji Satake. Springer, 2005

Furious earth: the science and nature of earthquakes, volcanoes and tsunamis. Von Ellen J. Prager. McGraw-Hill, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Die Weltkarte des Klaudios Ptolemaios – geodätisch entzerrt

Auf der Weltkarte des griechischen Gelehrten sind Europa, Nordafrika und Asien stark verzerrt dargestellt. Lange galt dies als Hinweis auf die Ungenauigkeit der antiken Landvermessung. Ein Projekt an der Technischen Universität Berlin rehabilitiert nun die Kartografen des Altertums.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Von Andreas Kleineberg, Eberhard Knobloch und Dieter Lelgemann

Chinesische und deutsche Geodäten trafen sich im Frühjahr 2003 am Fluss Wei bei Xi'an im Westen Chinas, um einen antiken Vermessungspunkt zu besichtigen. Die Stadt Xi'an ist durch die Ausgrabung der Terrakotta-Armee bekannt geworden: Tausende von Tonsoldaten, welche die Grabkammer des ersten chinesischen Kaisers Qin Shihuangdi beschützen sollten. Der Vater von Qin hatte in Nordwestchina eine Armee aufgebaut, mit der sein Sohn im 3. Jahrhundert v. Chr. ganz China eroberte. Wussten die beiden Chinesen von den makedonischen Herrschern Philipp und Alexander dem Großen sowie ihren Feldzügen, die gerade ein Jahrhundert zurücklagen? Wurde auf der Seidenstraße neben Handelsgütern auch Wissen transportiert? Die Römer kannten Xi'an unter dem Namen Sera Metropolis. Aus chinesischer Sicht markiert diese Stadt den Anfang jener Verkehrsroute, die seit dem Altertum den Fernen Osten mit Europa verband. Wie genau wussten die Griechen und Römer über die Geografie des Fernen Ostens Bescheid?

Daten von 6000 Orten

Eine Antwort gibt die »Geographike hyphegesis« (»Anleitung zur Geografie«) des Klaudios Ptolemaios. Dieses Buch des antiken Gelehrten enthält geografische Koordinaten von mehr als 6000 Orten in der *Oikumene*, dem von Menschen bewohnten Bereich der Erde, soweit er den Griechen bekannt war. Zu den Angaben gehören nicht nur Städte, sondern auch Geländemarken wie Berge und Inseln, die Quellen von Flüssen und ihre Mündungen an der Küste. Sie reichen von den Kanarischen Inseln bis nach China und von der legendären Insel Thule im hohen Norden bis nach Singapur.

Ptolemaios war ein griechischer Astronom und Mathematiker, der im 2. ▷

Die Weltkarte des Ptolemaios in einem kolorierten Holzschnitt von 1482. Die Himmelsrichtungen sind hier als zwölf Winde dargestellt.

▷ Jahrhundert n. Chr. in Alexandria lebte. Heute kennen wir ihn vor allem als Autor der »Mathematike syntaxis«, die zum Standardwerk der antiken Astronomie wurde und heute als »Almagest« berühmt ist. Bis zum 17. Jahrhundert blieb das darin beschriebene geozentrische Weltmodell grundlegend, auch wenn Ptolemaios' Werk bereits von Zeitgenossen, die ein heliozentrisches Modell bevorzugten, für falsch gehalten wurde.

Während die »Mathematike« das Bild der Himmelsbewegungen prägte, wurde die »Geographike« zur Grundlage der irdischen Geografie. Die auf ihr beruhende Weltkarte war im späten Mittelalter und der frühen Neuzeit weit verbreitet. Ptolemaios beschränkt sich auf die topografische Darstellung der Erdoberfläche, doch diese erscheint stark verzerrt und weckt Zweifel an der Zuverlässigkeit der antiken Geodäsie. Haben Landvermesser wirklich so ungenau gearbeitet, wie es die Karte suggeriert, oder wurden ihre Informationen erst bei der Erstellung der Weltkarte verzerrt?

Tatsächlich hat Ptolemaios seine Weltkarte aus einzelnen Teilkarten zusammengefügt. Dabei musste es fast zwangsläufig zu systematischen Verzerrungen kommen. Nichts spricht also gegen einen Versuch, die antiken Daten zu entzerren. Sobald dies gelungen ist, kann man nicht nur die Genauigkeit der antiken Kartografie erkunden, sondern vielleicht sogar verschollene Orte identifizieren und so Archäologen oder Historiker unterstützen. Mit dieser Absicht bildeten wir an der Technischen Universität Berlin eine interdisziplinäre Forschungsgruppe von Geodäten und Wissenschaftshistorikern. Seit Anfang 2004 wird unser Projekt von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Fußmaß und Ellenmaß

Vier Fragen standen am Anfang unserer Untersuchung:

▶ Welche Längeneinheiten waren zur Zeit des Ptolemaios in Gebrauch und welche wurden in den Teilkarten benutzt?

▶ Wie war es möglich, die geografische Breite mit astronomischen Verfahren exakt zu bestimmen? Präzise Messungen der geografischen Länge konnte es in der Antike nicht geben, denn diese setzen genaue, transportable Uhren voraus, welche es erst seit dem 18. Jahrhundert gibt.

▶ Mit welchen geometrischen Verfahren wurde im Altertum eine Landvermessung durchgeführt? Die heute übliche trigonometrische Landvermessung mittels Dreiecksketten ist schließlich eine Erfindung der Neuzeit.

▶ Auf welche Angaben für den Erdumfang sowie geografische Breiten wichtiger Orte konnte Ptolemaios zurückgreifen? Was müssen wir wissen, um seine Daten zu entzerren?

In einer akribisch durchgeführten Arbeit hat der Wissenschaftshistoriker Rolf Rottländer von der Universität Tübingen mehr als 850 nichtmetrische (also von der Meterskala unabhängige) Maßstabslängen gesammelt, die seit dem Altertum benutzt wurden, darunter auch das bis heute gebräuchliche Englische Fußmaß. Diese Maßstabslängen gehen auf ungefähr 30 Einheiten zurück, die sich wiederum durch wenige einfache Proportionen, die alle aus dem Altertum überliefert wurden (zum Beispiel 9:10 und 5:6), auf ein einziges Längenmaß zurückführen lassen: das Ellenmaß von Nippur, dem religiösen Zentrum des sumerischen Reiches.

Ein Exemplar der Nippur-Elle befindet sich heute im Museum des Frühen Orients in Istanbul. Auf einer Statue des Gudea von Lagasch, die sich heute im Pariser Louvre befindet, ist wiederum das von der Nippur-Elle abgeleitete Gudea-Fußmaß markiert (siehe Foto links). Gudea war ein sumerischer Stadtfürst, der um das Jahr 2100 v. Chr. lebte. Dass an seiner Statue ein Längenmaß angebracht ist, weist auf die Verbindung von Landvermessung und politischer Macht hin, die seit dem Altertum die Regel ist.

Beim Ausmessen größerer Entfernungen benutzten die Griechen als Längeneinheit das Stadion. Es ist definiert als das 600fache eines von der Nippur-Elle beziehungsweise dem Gudea-Maß abge-

Klaudius Ptolemaios in einem Fantasieporträt aus dem 16. Jahrhundert. In seiner rechten Hand hält er ein astronomisches Winkelmessgerät.

Längenmaß-Einheiten des Altertums

Nippur-Elle (NP)		518,5 mm
Remen der Nippur-Elle (RN)	RN = (20/28) NP	370,4 mm
Gudea-Maß (GF)	GF = (20/28) RN	264,55 mm
Oskisch-umbrischer Fuß (OUF)	OUF = (25/24) GF	275,6 mm
Stadion des Eratosthenes	= 600 Gudea-Maß	158,73 m
Griechisches Stadion	= 600 Oskisch-umbrischer Fuß	165,34 m
Stadion des Poseidonios/Ptolemaios	= 600 Remen der Nippur-Elle	222,24 m

Der Plan eines Tempels auf dem Schoß einer Statue des sumerischen Stadtfürsten Gudea von Lagasch. Darin eingezeichnet ist eine Längeneinheit, die als Gudea-Maß bekannt wurde.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

leiteten Fußmaßes. Abhängig von Epoche und Region waren unterschiedliche Stadienlängen in Gebrauch. Eratosthenes von Kyrene gab im 3. Jahrhundert v. Chr. für den Umfang der Erde eine Länge von 252 000 Stadien an. Damit entspricht ein Grad auf der Erdoberfläche 700 Stadien. Bildeten 600 Gudea-Fuß ein Stadion des Eratosthenes, dann folgt mit den Angaben aus der Tabelle links ein Erdumfang von 40 000 Kilometern. Ohne exakte Messungen wäre ein so genaues Ergebnis unmöglich. Später gab der Philosoph Kleomedes den Erdumfang mit 25 Myriaden Stadien (1 Myriade = 10 000) des Eratosthenes beziehungsweise 24 Myriaden griechische Stadien an. Strabon berichtet von einer Angabe des Poseidonios von 18 Myriaden = (3/4) · 24 Myriaden Stadien, von denen 500 ein Grad auf der Erdoberfläche ergeben; dieses Stadion benutzte Ptolemaios. Wie alle Gelehrten ihrer Zeit hegten Eratosthenes, Kleomedes und Ptolemaios an der Kugelgestalt der Erde keinen Zweifel.

Vom Schattenfänger zum Erdumfang

Eratosthenes hatte durch Verknüpfung mit der Astronomie in die Geografie das System von Längen- und Breitengraden eingeführt, das Ptolemaios über Hipparch in Form der bis heute benutzten Gradmaße übernahm. Nach Ptolemaios war es eine Aufgabe für Wissenschaftler, aus den Daten der Landvermesser geografische Koordinaten zu bestimmen. Welche Mittel sie dazu benutzten, beschreibt er in der »Geographike«. Die genauen Längenangaben, die in diesem Werk angegeben werden, beruhen auf dem von Ptolemaios beschriebenen geodätischen Verfahren der Bestimmung von Kardo und Decumanus (siehe Kasten auf S. 92). Meist führten Bematisten (»Schrittzähler«), die unter anderem Alexander den Großen und seine Nachfolger auf ihren Feldzügen begleiteten, die Strecken- und Richtungsmessungen durch.

Um die lokale Meridianrichtung und die geografische Breite zu messen, konnten die Landvermesser das Skiotheron (»Schattenfänger«) verwenden. Dieses Instrument wurde vermutlich bereits im 6. Jahrhundert v. Chr. von Thales von Milet und Anaximander zur Zeitmessung benutzt und seit Pytheas von Massalia im 4. Jahrhundert v. Chr. auch zur Breitenbestimmung. Obwohl es nur spärliche Literaturangaben darüber gibt, ist es uns gelungen, ein Skiotheron nachzubauen (siehe Abbildung rechts unten). Überrascht stellten wir fest, dass es die Genauigkeit eines modernen Sextanten erreicht. Man muss das Skiotheron als geniales Messgerät bezeichnen, denn mit ihm lassen sich alle fünf messbaren Winkel im so genannten Nautischen Dreieck der Sonne bestimmen. Zwischen den Wendekreisen konnte man die geografische Breite auch aus dem Zeitpunkt bestimmen, zu dem die Sonne mittags genau im Zenit steht und etwa in einem Brunnen keinen Schatten wirft.

Das von Ptolemaios beschriebene Verfahren der Landvermessung mittels Kardo und Decumanus ergibt die Differenzen der geografischen Breite und Länge zwischen dem Ausgangspunkt und dem Zielpunkt einer Messung. Addiert man die Koordinatendifferenzen, die zwischen aufeinander folgenden Orten gemessen wurden, so erhält man auch für Orte, die vom Ausgangspunkt weit entfernt sind, die geografische Länge und Breite. Ptolemaios berichtet in der »Geographike«, dass »die Alten« ein entsprechendes sphärisches Verfahren zur Bestimmung des Erdumfangs benutzt haben. Höchstwahrscheinlich ist damit Eratosthenes gemeint.

Wie präzise die Vermessungskunde des Altertums war, zeigt nicht nur der von Eratosthenes angegebene Erdumfang. Die Regionalkarten der »Geographike« wiesen nach unseren Erfahrungen eine Genauigkeit von ungefähr 10 Kilometern auf. Dies spricht dafür, dass sich viele der auf der Weltkarte des Ptolemaios sichtbaren Verzerrungen erst bei der Vereinigung dieser Karten einschlichen.

Ziel einer geodätischen Entzerrung ist es zum einen, grobe Einzelfehler, die etwa beim Kopieren entstanden sein können, in den ptolemaischen Daten zu identifizieren. Andererseits versuchen wir, mittels geeigneter Modelle Parameter für die Entzerrung zu bestimmen. Beides muss gleichzeitig erfolgen, und die Modelle sollen möglichst einfach sein. Die einfachsten Entzerrungsmodelle kommen ganz ohne Berechnung von Parametern aus; man verwendet ausschließlich die ptolemaischen und modernen Koordinaten eines Referenzorts sowie einen geeigneten Maßstabsfaktor.

Grundlage jeder geodätischen Entzerrung der Daten des Ptolemaios bilden die modernen Koordinaten bekannter Orte wie etwa London, Rom, Athen, Patna (Nordindien), Xi'an sowie die Ruinenfelder von Babylon und Persepolis. Dabei half uns vor allem der Barrington-Atlas. Diese Kartensammlung ist das Gemeinschaftswerk von 200 Historikern, Archäologen und Philologen, die in ▷

INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATIONSTECHNIK, TU BERLIN / DIETER LELGEMANN

Das Skiotheron (Schattenwerfer) wurde in der antiken Landvermessung benutzt. Messungen mit diesem Nachbau erreichten die Präzision eines modernen Sextanten.

▷ mehr als einem Jahrzehnt zahlreiche Ortsnamen der Griechen und Römer mit noch existierenden Städten oder Ruinenfeldern identifiziert haben. Zwar gelang dies bei vielen Orten in Europa, Nordafrika und dem Nahen Osten, doch ist die Unsicherheit im Mittleren und Fernen Osten oft beträchtlich. In diesen Gebieten hilft es uns, dass Ptolemaios in der »Geographike« nicht nur Ortsnamen anführt, sondern diese auch mit den Geländestrukturen der umliegenden Landschaft wie Küsten und Flüssen in Bezug setzt. Um ein widerspruchsfreies Ergebnis zu erzielen, ergänzen wir diese Informationen durch weitere Schriftquellen aus dem Altertum.

Bei unserem Versuch, die Weltkarte des Ptolemaios zu entzerren, stellten sich vier Aspekte als wesentlich heraus:

- Maßstabsfaktoren, hervorgerufen durch die Verwendung unterschiedlicher Stadienmaße in den einzelnen Länderkarten,
- grobe Fehler, nicht zuletzt entstanden durch Abschreibfehler in den einzelnen Manuskripten,
- großräumige und große Verzerrungen, beispielsweise in der geografischen Breite für die Nordküste von Afrika, und in geografischer Länge für die Südküste von Asien vom Persischen Golf bis Singapur,
- regionale, kleinere Verzerrungen zwischen einzelnen Ländern oder, wie etwa in Indien und Spanien, zwischen den Gebieten einzelner Volksgruppen.

Für einen ersten Überblick kann man von den 350 wichtigsten Städten der *Oikumene* ausgehen. Ptolemaios zählt diese im Schlußkapitel der »Geographike« auf; mehr als 300 dieser Städte gelten als sicher bestimmt.

Probeweise haben wir eine Entzerrung mit dem Referenzpunkt Athen und einem einheitlichen Maßstabsfaktor α = 500/700 für die gesamte *Oikumene* durchgeführt. Dies ist kein zufälliger Wert, sondern das Verhältnis des von Ptolemaios angenommenen Erdumfangs zu dem von Eratosthenes gemessenen Erdumfang. Bereits diese einfache Entzerrung führt zu einer durchaus akzeptablen Karte vom Atlantik bis nach China sowie von Thule (identifiziert als die Insel Hitra bei Trondheim) bis nach Meroe im Sudan.

Kolumbus reiste mit dem Atlas

Dass dieser Maßstabsfaktor die Karte insgesamt so deutlich verbessert, lässt die Vermutung aufkommen, dass Ptolemaios die Erde für zu klein hielt und die recht genauen Ortsmessungen bei der Übertragung in geografische Länge und Breite unbeabsichtigt verfälschte (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/1993, S. 82). Nach modernen Messungen beträgt der Radius der Erde 6371 Kilometer. Gehen wir jedoch von einem Erdradius von (500/700) · 6371 Kilometern = 4551 Kilometern aus, dann stimmen die tatsächlichen Entfernungen auf der Erde mit den aus den ptolemaischen Daten berechneten Entfernungsangaben gut überein. Das wusste auch der Seefahrer Christoph Kolumbus, und vielleicht hat dies zu seiner Überzeugung beigetragen, den westlichen Seeweg nach Indien und China entdeckt zu haben. Wir wissen, dass Kolumbus bei seiner Reise über den Atlantik einen auf der »Geographike« basierenden Atlas mitnahm und darin zahlreiche Anmerkungen eintrug.

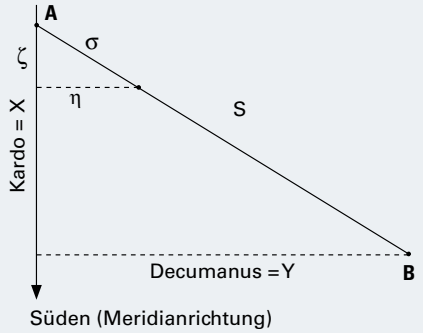
Nach der Freude über den Erfolg dieser einfachen Entzerrung erkannten wir schnell das Hauptproblem des Datenmaterials: vereinzelte grobe Fehler. Es sind Schreibfehler, wobei einige davon vielleicht sogar auf Ptolemaios selbst zurückgehen. Jedes der heute erhaltenen Manuskripte markiert den Endpunkt einer Geschichte des Kopierens, und manche enthalten möglicherweise sogar Versuche, das aufgeschriebene Wissen zu verbessern.

Ein Projekt der »Forschungsstelle Ptolemaios« an der Universität Bern versucht nun, Schreibfehler in den erhaltenen Fassungen der »Geographike« aufzuspüren. Unter der Leitung von Alfred Stückelberger werden dort mehr als fünfzig Abschriften und Drucke aus dem Mittelalter und der Renaissance miteinander abgeglichen. So wird sich zumindest die Überlieferungsgeschichte bis zum Ende des 13. Jahrhunderts zurückverfolgen lassen, denn aus dieser Zeit stammen die ältesten erhaltenen Handschriften dieses Werks. Nachdem die »Geographike« zunächst in Altgriechisch überliefert wurde, entstand 1406 unter dem Namen »Cosmographia« die erste lateinische Fassung. Im Jahr 1477 wurde das Werk zum ersten Mal gedruckt.

Zwar liefert bereits die erste Entzerrung eine erstaunlich gute Karte, doch ist diese noch lange nicht so genau, wie es die antiken Messverfahren erlaubten – ein Hinweis darauf, dass sich in den Daten weitere Verzerrungen verbergen. Um systematische Unterschiede zwischen den entzerrten und den modernen Koordinaten zu erkennen, müssen detaillierte Analysen des gesamten Datenmaterials unternommen werden.

Es ist nützlich, dabei die Abweichungen der geografischen Längen und Breiten getrennt zu betrachten. Im Asienteil einer grob entzerrten Weltkarte unterscheiden sich die Längenangaben von Orten an der Küste systematisch von denen im Landesinneren. Gegenüber den nördlichen Städten Xi'an, Samarkand (im heutigen Usbekistan) und Patna (Indien) sind die Orte an der Südküste sys-

Kardo und Decumanus



Die Landvermessung mit Hilfe der Bestimmung von Kardo und Decumanus war in der Antike besonders verbreitet. Der Ausgangspunkt A befindet sich im Abstand S vom Zielpunkt B. Der Kardo X ist die Nord-Süd-Distanz und der Decumanus Y die Ost-West-Distanz zwischen A und B. Für den Punkt A wurde zunächst die lokale Meridianrichtung bestimmt, wofür etwa das Skiotheron benutzt werden konnte. Anschließend markierte man in Richtung zu B eine Strecke σ, deren Komponenten ζ und η leicht zu messen waren. Nachdem die Strecke S durch Abschreiten oder mittels Seillängen gemessen wurde, konnte man Kardo und Decumanus mit dem Dreisatz leicht berechnen: $X = \zeta\,(S/\sigma)$ und $Y = \eta\,(S/\sigma)$. Bei diesem Verfahren sind keine Winkelmessungen notwendig. Die Krümmung der Erdoberfläche wird vernachlässigt.

INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATIONSTECHNIK, TU BERLIN / HARTMUT LEHMANN

Mit der im Text beschriebenen Methode wurden für diese Karte die in der »Geographike hyphegesis« angegebenen Koordinaten von 70 Orten entzerrt. Die Abweichungen von den tatsächlichen Koordinaten sind meist sehr gering.

tematisch um mehr als fünf Grad nach Westen verschoben – das sind bis zu 500 Kilometer.

Auch der Umgang mit den Breitenangaben erweist sich als tückisch, obwohl diese bereits damals sehr zuverlässig und genau bestimmt werden konnten. Während Ptolemaios die Breiten von Meroe (Sudan), Assuan (Ägypten) und seiner Heimatstadt Alexandria, von Siracusa und Marseille genau angibt, weichen die Angaben für Byzanz (das heutige Istanbul) um zwei beziehungsweise für Karthago sogar um vier Grad vom modernen Wert ab. Letzteres sind mehr als vierhundert Kilometer – in der überschaubaren Welt des Mittelmeers ein beträchtlicher Fehler. Wir erkannten schließlich, dass Ptolemaios diese Werte aus der »Geographia« des griechischen Historikers und Geographen Strabon übernahm, der sie wiederum bei Eratosthenes oder dem Astronomen Hipparch abgeschrieben haben musste.

Derzeit sind wir dabei, mittels des einfachsten Entzerrungsmodells – ein Referenzpunkt und ein durch Stadionbeziehungen vorgegebener Maßstabsfaktor – noch die kleineren regionalen Verzerrungen zwischen einzelnen Ländern zu reduzieren. So wurde bei einer Entzerrung des gesamten Mittleren Ostens vom Tigris bis Indien Xi'an als Referenzpunkt festgehalten und der Maßstabsfaktor $\alpha = 500/700$ benutzt. Die auf diese Weise in das moderne geografische System umgeformten Koordinaten des Klaudios Ptolemaios zeigen für die einzelnen Länder gegenüber modernen Koordinaten einheitliche Differenzen in den Längen und Breiten, die wir als Korrekturen verwenden können. Die restlichen Abweichungen betragen meist nur 10 bis 20 Bogenminuten. Größere Differenzen deuten auf mögliche Schreibfehler hin.

In Ländern wie Spanien und vor allem auch Indien reicht die Anwendung einer landeseinheitlichen Korrektur nicht aus. Hier lohnt es, für die Regionen der von Ptolemaios in der »Geographike« aufgeführten Völker jeweils gesonderte Korrekturterme einzuführen.

Von den mehr als 6000 Orten, deren geografische Koordinaten Ptolemaios in der »Geographike« angibt, konnte bis jetzt nicht einmal die Hälfte identifiziert werden. Sobald unser Projekt abgeschlossen ist, gibt es neue Hoffnung, zumindest einige dieser Orte aufzuspüren. Davon unabhängig hat uns die Entzerrung der Weltkarte bereits gezeigt, wie sehr die Genauigkeit der antiken Landvermessung bisher unterschätzt wurde. Das ist eine gute Gelegenheit, um die »Geographike hyphegesis« als ein Meisterwerk des Ptolemaios neu zu bewerten. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Andreas Kleineberg (links) ist Dozent für Latein und Altgriechisch an der Humboldt-Universität zu Berlin und ist seit 2004 Mitarbeiter im »Geographike«-Projekt an der Technischen Universität Berlin. **Eberhard Knobloch** (Mitte) ist seit 2002 Akademieprofessor für Wissenschafts- und Technikgeschichte an der Technischen Universität Berlin und der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Er ist Präsident der Académie Internationale d'Histoire des Sciences (Paris). **Dieter Lelgemann** war bis 2004 Professor für astronomische und physikalische Geodäsie an der Technischen Universität Berlin. Im Ruhestand wird er seine Forschungen über die Methoden und Resultate der Angewandten Mathematik im Altertum fortsetzen.

Zum antiken astro-geodätischen Messinstrument Skiotherikós Gnomon. Von Dieter Lelgemann, Eberhard Knobloch, Andreas Fuls und Andreas Kleineberg in: ZfV – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Bd. 4, S. 238, 2005

Zur hellenistischen Methode der Bestimmung des Erdumfanges und zur Asienkarte des Klaudios Ptolemaios. Von Eberhard Knobloch, Dieter Lelgemann und Andreas Fuls in: ZfV – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Bd. 2, S. 1, 2003

Ptolemy's geography: an annotated translation of the theoretical chapters. Von J. Lennart Berggren und Alexander Jones. Princeton University Press, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Lahmt der Golfstrom?

Die globale Erwärmung könnte einen Kollaps ganzer Strömungssysteme auslösen – mit katastrophalen Folgen. Doch erst jetzt wird die Zirkulation im Atlantik ausreichend beobachtet, die Europa mit Wärme versorgt.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Von Quirin Schiermeier

Henry Ellis, Kapitän des britischen Sklavenschiffs »Earl of Halifax«, hatte einen Hang zur Wissenschaft. Während er 1751 über den subtropischen Atlantik segelte, ließ er mit einem Behälter, der an einem langen Seil hing und beim Heraufziehen zuklappte, Wasserproben aus unterschiedlichen Tiefen holen und maß mit einem Thermometer deren Temperatur. Zu seiner Überraschung war das Wasser in einer mittleren Tiefe von rund 1200 Metern am kältesten. Er schloss daraus, dass die Sonne den Ozean nicht wie erwartet umgekehrt proportional zur Tiefe erwärmt.

Für Ellis' Mannschaft war die Entdeckung von Vorteil: »Auf diese Weise konnten wir ein erfrischendes Bad nehmen und Wein oder Wasser nach Belieben kühlen«, notierte der Kapitän. Doch die globale Bedeutung des kalten Tiefenwassers im Atlantik entging Ellis – wie den meisten in den folgenden zweihundert Jahren.

Ellis war auf den Generator eines weltumspannenden Strömungssystems gestoßen; das »globale Förderband« transportiert warmes Oberflächenwasser zu den Polen und kaltes Tiefenwasser zurück in die Tropen. Diese von Temperatur- und Salzgehaltunterschieden angetriebene »thermohaline« Zirkulation wurde in den letzten Jahren geradezu berüchtigt als mögliche Ursache einer großen Klimaschwankung. Doch erst seit 2005 sind automatische Systeme in Betrieb, um diese Zirkulation kontinuierlich zu überwachen. »Die Daten haben wir bitter nötig«, sagt Gavin Schmidt, führender Klimamodellforscher am Goddard Institute for Space Studies der Nasa in New York. »Erstmals werden wir das Ozean-›Wetter‹ in all seiner Komplexität beobachten können.«

Das von Ellis entdeckte kalte Tiefenwasser stammt aus zwei Regionen im äußersten Norden des Atlantiks: der Grönlandsee und der Labradorsee. Dort kühlt sich nordwärts strömendes, stärker salzhaltiges Wasser ab und sinkt in die Tiefe, bevor es nach Süden zurückkehrt. Diese große untermeerische Schleife ist eine Besonderheit des Nordatlantiks, dessen Wasser auf Grund extrem niedriger Temperaturen und starker Salzigkeit eine höhere Dichte hat als im Indischen oder Pazifischen Ozean.

Ein labiles Förderband

Indizien aus der Eiszeit besagen, dass Verschiebungen der thermohalinen Zirkulation die Temperaturen in Westeuropa und darüber hinaus dramatisch beeinflusst haben. Einstige Stillstände des Förderbands kühlten binnen weniger Jahre die gesamte Region um den Nordatlantik drastisch ab, weil die Strömungen ausblieben, die warmes Wasser nach Norden führen. Computermodellen zufolge könnte diese regionale Abkühlung – scheinbar paradoxerweise – durch globale Erwärmung ausgelöst werden. Zu Beginn unseres Jahrhunderts ist die Empfindlichkeit der thermohalinen Zirkulation zum prominentesten Beispiel für die überraschenden, nichtlinearen und möglicherweise katastrophalen Klimaänderungen avanciert, die den Treibhauseffekt so bedrohlich erscheinen lassen.

Doch die Strömungen selbst sind immer noch erstaunlich wenig erforscht. Bis jetzt beruhen alle Daten über die Tiefen des Atlantiks letztlich auf der Methode von Kapitän Ellis: Man fährt auf der Oberfläche umher und holt unterwegs Wasser aus verschiedenen Tiefen. Erst im Lauf des Jahres 2006 werden die Wissenschaftler kontinuierlich Messdaten von 22 fest verankerten »Profilern« bekommen. Diese Sensoren, die an Seilen zwischen Bojen an der Oberfläche und Ankern am Meeresboden auf- und niederwandern, wurden 2005 im Rahmen eines britischen Programms namens Rapid Climate Change (kurz Rapid) installiert. Rapid ist ein Projekt des Natural Environment Research Council mit sechs Jahren Laufzeit und einem Budget von 20 Millionen Pfund (30 Millionen Euro); es hat zum Ziel, Wahrscheinlichkeit und Ausmaß eines künftigen Klimasturzes abzuschätzen.

Für diese Daten interessieren sich Klimatologen weltweit. Nach den jüngsten, 2005 in der Zeitschrift »Nature« veröffentlichten Untersuchungen per Schiff scheint die Zirkulation noch labiler zu sein als angenommen. Doch anderen Forschungen zufolge wäre der mögliche Schaden viel subtiler als das Szenario einer Kleinen Eiszeit in Europa.

Die Idee, eine Veränderung der ozeanischen Zirkulation könnte ein entscheidender Faktor des Klimawandels sein, geht auf das frühe 20. Jahrhundert und den bedeutenden amerikanischen Geologen Thomas Chamberlin zurück. In den 1950er Jahren leistete der Ozeanograf Henry Stommel Pionierarbeit bei der Untersuchung der dreidimensionalen Struktur der Ozeane und der Strömungen, die oben und unten unterschiedlich fließen. Doch der nordatlanti-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

sche Zweig des großen Förderbands verdankt seine gegenwärtige Berühmtheit einer erst 1984 entwickelten Theorie. Damals besuchte Wallace Broecker, Geochemiker am Lamont Doherty Geophysical Observatory der Columbia-Universität in New York, einen Vortrag des Schweizer Klimatologen Hans Oeschger in Bern. Während Oeschger seine neuesten Ergebnisse über Klima-Instabilitäten und starke Schwankungen des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre während der letzten Eiszeit vorstellte, kam Broecker der Gedanke, als Ursache käme das An- und Abschalten der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik in Frage. Vielleicht hatte der zeitweise Stillstand des atlantischen Förderbands verheerende Auswirkungen gehabt.

Zwar erwiesen sich die Kohlendioxidschwankungen, die Oeschger erklären wollte, später als Scheineffekte, aber die Idee, das Förderband könnte mit seinen Stopps und Starts das globale Klima erschüttern, hielt stand. 1985 publizierten Broecker und seine Kollegen eine wichtige Arbeit, die sich auf frühe Computermodelle der Meeresströmungen stützte. Demnach hat die Zirkulation des Atlantiks zwei stabile Zustände – einen mit laufendem und einen mit gestopptem Förderband –, die sich relativ leicht abwechseln können. Der Unterschied der beiden Zustände könnte den Wechsel zwischen Eiszeiten und wärmeren Zwischenperioden erklären. Bald darauf zeigten neue Modelle, dass ein Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre die Temperatur und damit die Zufuhr von Süßwasser in den Nordatlantik erhöht – und dadurch einen Stillstand des Förderbands zu bewirken vermag.

Böse Überraschung im Treibhaus

Die Idee einer Schwelle, deren Überschreiten eine Katastrophe verursachen kann – in Broeckers Worten »eine böse Überraschung im Treibhaus« –, spielte in den Debatten um den Treibhauseffekt eine immer wichtigere Rolle. Ende der 1990er Jahre kam William Calvin mit seinem Artikel »The Great Climate Flip-Flop« (Die große Klimaschaukel) auf das Titelblatt der US-Zeitschrift »The Atlantic Monthly«. Als Neurophysiologe interessierte Calvin sich für die Frage, ob rascher Klimawandel ein entscheidender Faktor bei der Evolution des Menschen war. Einige Jahre später, 2003, beschrieb ein Bericht an das Pentagon namens »Imagining the Unthinkable« (Das Undenkbare denken), wie ein Förderbandstopp durch eine rasche Klimaveränderung ganze Gesellschaften und das friedliche Zusammenleben von Nationen in Gefahr bringt. Kurz darauf malte der Film »The Day after Tomorrow« aus, wie die Bevölkerung der Vereinigten Staaten vor einer plötzlich einsetzenden Eiszeit über die mexikanische Grenze flüchtet. Wiederum war der Nordatlantik schuld.

In manchen Klimaszenarien würde ein Stopp atlantischer Strömungen – insbesondere des Golfstroms – Europa arktische Kälte bescheren.

Darum war die Aufregung groß, als »Nature« im November 2005 einen Artikel veröffentlichte, wonach die thermohaline Zirkulation sich deutlich verlangsamt. Die Indizien hatten Harry Bryden, Ozeanograf an der Universität Southampton (Großbritannien), und seine Mitarbeiter auf einer Forschungsfahrt gesammelt, die zugleich die Installation des Rapid-Programms abschloss.

Als Bryden und sein Team ihre Messwerte von 2004 mit Daten von 1957, ▷

NATURE, NACH: NATIONAL OCEANOGRAPHY CENTRE, SOUTHAMPTON

Das »globale Förderband« transportiert warmes Oberflächenwasser zu den Polen und kaltes Tiefenwasser zurück in die Tropen. Ein Zweig, der Golfstrom, erwärmt das Klima in Europa.

▷ 1981, 1992 und 1998 verglichen, stellten sie fest, dass ein Teil des warmen Oberflächenwassers jetzt anscheinend im subtropischen Atlantik gefangen blieb: Statt sich nordwärts zu bewegen, strömte es Richtung Osten und kehrte dann nach Süden zurück. Insgesamt schien die Zirkulation in 25 Grad nördlicher Breite – wo Ellis vor 250 Jahren erstmals Meeresproben genommen hatte – um etwa 30 Prozent abgenommen zu haben.

Das Ergebnis überraschte die Experten. Kaum jemand hatte gedacht, dass die thermohaline Zirkulation sich so schnell und so dramatisch verlangsamen könne. Nach den Modellen sollte die für einen Stillstand des Förderbands nötige Süßwasserzunahme erst bei einer weltweiten Erwärmung um 4 bis 5 Grad Celsius eintreten. Die Erwärmung im Verlauf des 20. Jahrhunderts wird gegenwärtig mit 0,6 Grad Celsius angegeben. Die aufwändigsten Computermodelle für Klima und Ozeane, die benutzt werden, um Klimavorhersagen für das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zu machen, besagen, dass die Strömung sich bis Ende des 21. Jahrhunderts um rund 25 Prozent verringern wird, aber nicht komplett zum Stillstand kommt.

Da hochkomplexe Modelle beim Simulieren mancher Prozesse ungeheuer viel Rechenzeit verschlingen, springen in solchen Fällen »mittelkomplexe« Modelle ein. Stefan Rahmstorf, Ozeanograf am Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK), verglich kürzlich, wie in elf einfacheren Modellen die Zirkulation auf einen Zufluss von Süßwasser reagiert. Alle zeigen einen Schwellenwert oder Bifurkationspunkt, jenseits dessen das Förderband nicht mehr funktioniert. Nach der Höhe des Schwellenwerts ist ein Stillstand zwar durchaus möglich, steht aber nicht unmittelbar bevor. Rahmstorf hält es für »sehr unwahrscheinlich, dass es für die thermohaline Zirkulation innerhalb der nächsten hundert Jahre wirklich kritisch wird«.

Das soll nicht heißen, die Süßwasserströme würden nicht zunehmen. Die jährliche Abflussmenge der sechs größten Flüsse, die sich ins Nordpolarmeer ergießen – wie Ob, Lena und Jenissej –, ist jetzt 128 Kubikkilometer größer als am Beginn regelmäßiger Messungen vor 70 Jahren. Das entspricht einer Zunahme von rund 7 Prozent. Außerdem schmilzt das Meereis wegen der steigenden Temperaturen rascher ab. Besonders beunruhigend ist, dass der riesige Eisschild Grönlands Zeichen des Zerfalls zeigt; er schrumpft derzeit um schätzungsweise 50 Kubikkilometer pro Jahr.

Delikates Gleichgewicht

Ruth Curry, Forscherin an der Woods Hole Oceanographic Institution in Massachusetts, hat jüngst untersucht, wie viel von diesem zusätzlichen Süßwasser in den Teilen der Grönland- und Labradorsee verbleibt, die für das Funktionieren der thermohalinen Zirkulation entscheidend sind. Ihrer Analyse der Salzgehaltdaten von 1950 bis 2005 zufolge haben sich seit den 1960er Jahren in den oberen Ozeanschichten 4000 Kubikkilometer Süßwasser angesammelt – das Achtfache der Wassermenge, die pro Jahr den Mississippi hinunterfließt. »Die zusätzliche Süßwasserzufuhr fängt an, die Dichte zu beeinflussen«, sagt sie. Doch die Süßwassermenge, die laut Rahmstorfs Vergleichsstudie für einen Stillstand der thermohalinen Zirkulation nötig wäre, liegt noch eine Größenordnung darüber, und auch Curry meint, dass die Zirkulation in diesem Jahrhundert wenig Wirkung zeigen wird. Peter Wadhams, Ozeanograf an der Universität Cambridge, berichtete 2005 zwar von einer deutlichen Schwächung der »Konvektionsschlote«, durch die Oberflächenwasser in der Grönlandsee abwärts sinkt, doch wie viel davon natürliche Schwankungen sind, ist schwer zu sagen.

Dies alles lässt sich schlecht mit Brydens Befund vereinbaren, wonach schon jetzt eine deutliche Verlangsamung stattfinden soll. »Da geht etwas Seltsames vor«, meint Michael Schlesinger, Klimamodellierer an der Universität von Illinois in Urbana-Champaign; er hält einen Zirkulationsstopp für wahrscheinlicher und beunruhigender als viele seiner Kollegen. »Falls Brydens Ergebnisse zutreffen, reagiert die Zirkulation viel sensibler auf Süßwasser, als je ein Modell vorhergesagt hat.«

Die Resultate sind nicht nur unerwartet – sie passen auch schlecht zu anderen Daten. Falls die Zirkulation sich so verlangsamt, wie Bryden behauptet, müsste es in Europa eigentlich schon kälter werden. Der Nordatlantik transportiert rund ein Petawatt (10^{15} Watt) Wärme nach Europa – so viel wie 500 000 große Kraftwerke. Eine Schwächung dieser Strömung müsste das Klima abkühlen, aber davon ist nichts zu bemerken.

Vielleicht neigt das System zu unerwartet starken natürlichen Schwankungen. Oder vielleicht zeichnete Bryden gar kein Signal auf, sondern Rauschen. Erweckte eine Folge von Messungen durch zufällige Meereswirbel und andere natürliche Störungen den Eindruck, die Zirkulation verlangsame sich, obwohl dies gar nicht der Fall ist? Ein statistischer Scheineffekt kann nicht ausgeschlossen werden. »Die Ergebnisse basieren schließlich auf nur fünf Schnappschüssen eines extrem verrauschten und wenig untersuchten Systems«, sagt Carl Wunsch, Ozeanograf am Massachusetts Institute of Technology (MIT), der schon seit

Langem die Bedeutung der thermohalinen Zirkulation und ihres möglichen Erliegens anzweifelt. »Die Geschichte ist attraktiv, interpretiert aber die Daten sehr einseitig. Als würde man die Temperatur in Hamburg an fünf zufälligen Tagen messen und daraus folgern, dass das Klima wärmer oder kälter wird.«

Bryden wehrt sich gegen seine Kritiker mit Daten über die Dichte des Ozeans in verschiedenen Tiefen, die zeitgleich mit den Strömungsdaten gewonnen wurden und unabhängig davon die Behauptung stützen, die Zirkulation verlangsame sich. Andere Wissenschaftler urteilen zwar weniger streng als Wunsch, doch viele bleiben vorsichtig. »Brydens Ergebnisse sind außergewöhnlich«, meint Schmidt, »aber genau darum erfordern sie auch außergewöhnliche Beweise.«

Falls Brydens Ergebnisse stichhaltig sind, gibt es eine andere Erklärung für die ausbleibende Abkühlung in Europa: Eine Verlangsamung der thermohalinen Zirkulation hat vielleicht gar nicht so schlimme Folgen wie angenommen. Möglicherweise wurde insbesondere ihre Auswirkung auf das heutige, sich erwärmende Klima Europas überschätzt. Ein Artikel aus dem Jahr 2002 behauptet, dass die in mittleren Breiten dominierenden Westwinde eine ungeahnt große Rolle spielen. Doch ein großer Teil der in der Atmosphäre transportierten Wärme stammt letztlich aus dem Meer. »Es stimmt, dass die Atmosphäre die Schwerarbeit leistet«, sagt der Broecker-Schüler Jeff Severinghaus, Ozeanograf an der Scripps Institution for Oceanography in La Jolla (Kalifornien). »Aber der Ozean übt die Kontrolle aus, genau wie der Fahrer eines Autos.«

Die Argumente für die enormen Auswirkungen einstiger Zirkulationsabbrüche sind kaum zu widerlegen. Der beste Beweis ist eine 1300 Jahre lange Kälteperiode vor ungefähr 12 000 Jahren, in der Jüngeren Dryas. Das Kohlenstoffisotopen-Verhältnis in fossilem Plankton belegt, dass die thermohaline Zirkulation damals viel langsamer ablief als heute; langsame Zirkulation ermöglicht es leichten Kohlenstoffisotopen, sich nahe der Meeresoberfläche anzusammeln.

Diese Verlangsamung traf mit einem gewaltigen Zufluss von Süßwasser in den Nordatlantik zusammen. Das Abschmelzen der Eiskappen gegen Ende der Eiszeit erzeugte in Nordamerika ein riesiges Süßwasserbecken von der Größe Deutschlands, den so genannten Agassiz-See. Er erstreckte sich über Teile von Minnesota, Dakota und Manitoba. Im Osten begrenzte ihn eine Zunge des Laurentischen Eisschilds. Als diese Barriere kollabierte, ergoss sich eine gewaltige Wassermenge durch den Sankt-Lorenz-Strom in den Atlantik.

Schnee von gestern?

In Grönland erbohrte Eiskerne zeigen an, dass es ähnlich starke Temperaturschwankungen – die Dansgaard-Oeschger-Ereignisse, auf die Broecker erstmals in den 1980er Jahren aufmerksam wurde – während der gesamten 90 000 Jahre der letzten Eiszeit immer wieder gab. Wahrscheinlich wurden auch sie durch einen Stillstand der thermohalinen Zirkulation verursacht.

Doch das ist Schnee von gestern. Die Folgen eines Stillstands könnten vom jeweils herrschenden Klima abhängen. Broecker glaubt jetzt, dass es zur Abkühlung in der Jüngeren Dryas und während der Dansgaard-Oeschger-Ereignisse kam, weil der Zirkulationsstopp durch einen Rückkopplungseffekt in Form winterlicher Eisbildung auf dem Meer verstärkt wurde. Zufluss von Süßwasser in hohen Breiten fördert die Bildung von Meereis, da es leichter gefriert. Weil Eis Sonnenlicht vom Meer abschirmt und die Meereswärme von der Atmosphäre isoliert, verstärkt die Ausbreitung von Meereis die durch den Zirkulationsstopp ausgelöste Abkühlung ganz erheblich, vor allem im Winter. Untersuchungen an Moränen in Grönland und Skandinavien zeigen, dass während der Jüngeren Dryas die Abkühlung im Sommer relativ moderat blieb, während die Winter gut 30 Grad kälter waren als heute.

Es ist schwierig, den Verstärkungseffekt des Meereises genau zu berechnen. Die meisten Modelle mit Ozean-Atmosphäre-Kopplung enthalten eine Eiskomponente, aber die Simulation ist grob und ergibt eine unrealistische Eisverteilung. Wenn diese Rückkopplung so wichtig ist, wie Broecker glaubt, müsste sich ein Zirkulationsstopp auf einer warmen Erde ganz anders auswirken als während der Eiszeiten und unmittelbar danach. Heute zeigen Satellitenbilder die Meereisdecke auf einem historischen Tiefstand. In einer Welt, deren Erwärmung ausreicht, einen Stopp der thermohalinen Zirkulation auszulösen, gibt es nach den meisten Modellen fast gar kein Meereis.

Rahmstorf spricht für viele Klimaforscher, wenn er die Behauptung zurückweist, ein thermohaliner Stillstand würde beim heutigen Klima zu einer Neuauflage der Jüngeren Dryas führen, in der große Teile Europas zugefroren waren. »Sie können nicht einfach einen linearen Zusammenhang annehmen und sagen, dass alles genauso passieren würde, nur eben auf einem 5 Grad höheren Temperaturniveau«, meint Rahmstorf. Broecker glaubt immer noch, dass die globale Erwärmung Überraschungen bereithalten könnte, möglicherweise auch einen Kollaps der thermohalinen Zirkulation. Doch wie er zugibt, ist »die Vorstellung, dies könnte eine Kleine Eiszeit auslösen, ein Mythos«.

Dass ein künftiger Stillstand nicht die vorhergesagten Auswirkungen auf das Klima haben muss, könnte einiger- ▷

BEIDE FOTOS: NATIONAL OCEANOGRAPHY CENTRE, SOUTHAMPTON

Neu installierte Sensoren messen Salzgehalt und Temperatur im Atlantik. Ozeanograf Harry Bryden erwartet davon eine Bestätigung seiner These, dass die atlantische Strömung erlahmt.

S. PORTER (LI); M. PELTIER (MI); C. WUNSCH (RE)

Geochemiker Wallace Broecker, Klimamodellierer Gavin Schmidt und Ozeanograf Carl Wunsch (von links) erforschen die atlantische Zirkulation.

▷ maßen erklären, warum Bryden eine Verlangsamung – oder zumindest Fluktuation – der Zirkulation beobachten konnte, die bisher jedoch ohne größere Folgen für das Klima geblieben ist. Severinghaus und viele seiner Kollegen glauben aber eher an ein zufälliges falsches Signal in den Daten. »Es passt einfach nicht recht zusammen«, sagt Schmidt. »Falls die Zirkulation seit einem Jahrzehnt um 30 Prozent geringer ist, sollte dadurch die Temperatur der Meeresoberfläche mindestens um 1 bis 2 Grad Celsius gefallen sein, selbst wenn nicht ganz Europa abgekühlt wurde. Doch so etwas ist nicht zu beobachten.«

Bryden meint, das neue Rapid-System zur Aufzeichnung der Strömungen im Atlantik sollte in den nächsten zehn Jahren klären, ob er eine langfristige Verlangsamung entdeckt hat oder nur eine natürliche Fluktuation. Auch das Argo-System könnte hilfreich sein. Es ist Teil des internationalen Global Climate Observing System – eine Flotte von Roboter-Flößen zeichnet Temperatur, Salzgehalt und Strömung in den oberen 2000 Metern des Indischen, Atlantischen und Pazifischen Ozeans auf. Die frei treibenden Flöße sinken in vorgegebene Tiefen und steigen an die Oberfläche, um ihre Daten an Satelliten zu senden. Argo-Daten seien von unschätzbarem Wert, um Veränderungen in abgelegenen Meeresregionen zu registrieren, betont Lynn Talley, Ozeanografin der Scripps Institution for Oceanography in San Diego (Kalifornien). Sie haben bereits rund um die Antarktis eine drastische Erwärmung des Südpolarmeers enthüllt.

Örtliche Sensoren sind nicht die einzige Möglichkeit, die Tiefsee im Auge zu behalten. Eine Abschwächung der thermohalinen Zirkulation würde die gesamte Topografie der Meeresoberfläche verändern, betont Rahmstorf. Einer neuen Simulation zufolge müsste der Spiegel des Nordatlantiks an manchen Stellen um bis zu einen Meter steigen, weil er sich an die Dichte der Strömungen unter der Oberfläche anpasst – mancherorts um bis zu 2,5 Zentimeter pro Jahr. Wissenschaftler setzen nun Höhenmessungen per Satellit ein, um solche Veränderungen aufzuspüren. Davon erwarten sie binnen zehn Jahren handfeste Ergebnisse.

Auch die Modellforscher haben viel zu tun. Die meisten Modelle – etwa die des IPCC – untersuchen, wie ein durch Süßwasser verursachter Zirkulationsstopp die Temperaturen verändert, wenn alles Übrige gleich bleibt. Schwerer lässt sich beantworten, was ein thermohaliner Stillstand in einer Welt bedeutet, die sich im Mittel erwärmt. Brydens Daten haben in der gesamten Klimaforschergemeinde für Aufregung gesorgt: Die Autoren der Kapitel über Meeresphysik und Zirkulation im vierten Bericht des IPCC, der 2007 erscheinen soll, überarbeiten ihre Manuskripte.

Folgen für die Nahrungskette

Wolfgang Cramer, Ökologe am PIK, sagt komplizierte Klimafolgen voraus, wobei einige Effekte einander verstärken, andere sich aufheben. Durch meteorologische Störungen infolge eines thermohalinen Stillstands könnten große Überschwemmungen und Stürme in Europa dramatisch zunehmen, selbst wenn die mittlere Temperatur nicht fällt. »Nicht der Mittelwert, sondern die Extreme sind besonders beunruhigend«, betont Cramer.

Die thermohaline Zirkulation schafft nicht nur Klimaprobleme. Sie beeinflusst auf der ganzen Welt die Geschwindigkeit, mit der nährstoffreiches Wasser aus der Tiefe an die Oberfläche steigt. Wie eine kürzlich durchgeführte Simulation zeigt, könnte ein Zirkulationsstopp die Planktonbestände im Nordatlantik auf weniger als die Hälfte ihrer heutigen Biomasse dezimieren. Weltweit wäre eine Abnahme des Planktons um mehr als 20 Prozent zu erwarten.

»Plankton bildet die Basis der marinen Nahrungskette. Daher würde eine weltweite Abnahme der Plankton-Biomasse und -Produktivität auch Folgen für Fische, Tintenfische und Wale haben«, sagt Andreas Schmittner, Klimaforscher an der Oregon State University in Corvallis. »Eine schwächere Umwälzung des Atlantiks könnte weniger Fisch für die Küstenbewohner des Pazifischen und Indischen Ozeans bedeuten.«

Außerdem sagen die Modelle als Folge des Stopps eine Erwärmung in den Tropen oder – überraschenderweise – in Alaska und der Antarktis voraus. Auch die Niederschlagsverteilung könnte sich ändern. Eine Verlagerung des Wärmeäquators nach Süden – wie sie mit dem Zirkulationsstopp in den Eiszeiten einherging – könnte zum Ausbleiben der Monsunregen sowie zu Dürren in Asien und der Sahelzone führen, meint Severinghaus. Diese Effekte scheinen unabhängig von Meereis aufzutreten. Solche Verschiebungen könnten die armen Bauern in vielen Teilen der Erde hart treffen – viel härter als kältere Winter die wohlhabenden Nordeuropäer.

Obwohl 250 Jahre vergangen sind, seit Kapitän Ellis dem Atlantik erstmals Proben entnahm, bergen die Tiefen immer noch Geheimnisse und Gefahren. Selbst mit kontinuierlichen Messungen und besseren Modellen wird es einige Zeit dauern, bis die Wahrscheinlichkeit und die vermutlichen Folgen eines Stillstands der thermohalinen Zirkulation genau vorhergesagt werden können. Dieses komplizierte System hängt von vielem ab: vom delikaten Gleichgewicht zwischen Süß- und Salzwasser in riesigen Ozeanbecken, von Details der atmosphärischen Zirkulation, von windgetriebenen Strömungen und von der Topografie des Meeresbodens in der Tiefsee. »Falls man erfahren möchte, wie ein Planet funktioniert, würde man wahrscheinlich nicht die Erde wählen«, bemerkt Schlesinger. Doch wir Treibhausbewohner haben keine andere Wahl. ◁

Quirin Schiermeier ist der deutsche Korrespondent von »Nature«.

© Nature (www.nature.com/nature)

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Der Klimawandel. Von Stefan Rahmstorf und Hans-Joachim Schellnhuber. C.H.Beck, München 2006

Plötzliche Klimawechsel. Von Wallace S. Broecker in: Spektrum der Wissenschaft 1/1996, S. 86

Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N. Von Harry L. Bryden et al. in: Nature, Bd. 438, S. 655, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

»Biertischtheologie ist nicht die Lösung«

Über das Verhältnis von Wissenschaft und Religion diskutieren der Kosmologe Gerhard Börner und der katholische Theologe Hans Küng.

Spektrum: Herr Professor Küng, wie ist das Verhältnis von Theologie zur Naturwissenschaft?

Küng: Im Ganzen gesehen ist das Verhältnis von Kirche, von katholischer Kirche in diesem Fall, zur Physik relativ entspannt. Es ist schwieriger in der Biologie, und noch schwieriger zum Teil in Fragen der Psychologie und Hirnforschung.

Spektrum: Herr Professor Börner, sind Wissenschaft und Religion strikt getrennte Ebenen, wo sich jeder besser aus dem jeweils anderen Bereich heraushält?

Börner: Ich würde lieber sagen, Wissenschaft und Religion sprechen verschiedene Bereiche der Wirklichkeit an. Es gibt eben einen Bereich, für den die Naturwissenschaft zuständig ist. Der ist eingeschränkt auf Objektivierung. Ich nehme an, es gibt eine reale Welt, die mir gegenüber steht. Das Subjekt, um das sich die Religion kümmert, ist ausgeklammert, es kommt in der Physik nicht vor. Ob es sonst vorkommt, auch darüber macht die Physik keine Aussage.

Spektrum: Diese Trennung – ist sie strikt oder unscharf?

Küng: Sie muss jedenfalls prinzipiell gesehen werden. Es gibt Fragen, in denen die Religion einfach nicht zuständig ist, wie die Entstehung des Kosmos. Das gilt jedoch auch umgekehrt, bei Fragen etwa nach dem Urgrund, dem Ursinn des Ganzen, den ethischen Standards, der geistigen Heimat.

Das ist aber nur der eine Aspekt. Es gibt auf beiden Seiten zahllose Fragen, wo man sich bei den Kollegen der anderen Fakultät kundig zu machen hat.

Spektrum: Ist Schöpfung, die Sie ja in Ihrem Buch »Der Anfang aller Dinge« ausführlich behandeln, so ein Thema? Hat hier, wo auch die Physik an Grenzen stößt, die Religion einen besseren Zugang?

Küng: Ich bewundere, was seit Kopernikus und Galilei gerade in der Kosmologie erarbeitet wurde. Und ich bin neugierig und möchte wissen, wie das alles abgelaufen ist. Das ist unabhängig von meinem Glauben, der von einer anderen Quelle herrührt. Aber dann frage ich mich auch, wie sich das Geschehen der »Ersten drei Minuten« zum Schöpfungsbericht in der Bibel über die ersten sieben Tage verhält.

Das Urknallmodell ist eine Theorie, die ihre Grenzen selbst aufzeigt

Spektrum: Wäre das nicht eine Lückenbüßertheorie, also die Suche nach einem »God of the Gaps«?

Küng: Eine aufgeklärte Theologie hat sicher von den massiven Fehlern von Theologen und Kirche in der Vergangenheit gelernt. Das waren ständige Rückzugsgefechte. Die Gefahr ist immer, dass solche Lücken geschlossen werden und man sich weiter zurückziehen muss, auf immer kleinere Bereiche. Deshalb ist ein Lückenbüßergott bei allen negativ besetzt.

Börner: Auch nach meinem Eindruck hält die Mehrzahl der Theologen das für schlechte Theologie, Gott in den Lücken der Naturwissenschaft unterzubringen. Dennoch finde ich die Entstehung des Kosmos und den Schöpfungsbericht so interessant, weil das eine Nahtstelle ist, wo sich beide Fächer berühren.

Spektrum: Wieso?

Börner: Ganz primitiv gesehen, macht die Religion Aussagen über das Weltbild, über den Menschen und die Stellung des Menschen in der Welt. Da muss sie natürlich das naturwissenschaftliche Weltbild zur Kenntnis nehmen.

Küng: Diese Berührungen gibt es. Aber Vorhaben wie die, vielleicht vergebliche, Suche nach der Weltformel, sind eigentlich Fragen der Weltinnenarchitektur, während es der Religion um andere Fragen geht. Für den allerersten Ursprung von Raum und Zeit ist die Physik nicht mehr zuständig.

ALLE FOTOS DIESES ARTIKELS: MANFRED GROHE / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Kritischer Diskurs bei Kaffee und Kuchen: Hans Küng und Gerhard Börner mit den Spektrum-Redakteuren Reinhard Breuer und Götz Hoeppe (v. l. n. r.)

Spektrum: Herr Börner, ist das so?

Börner: Die Modelle vom Kosmos sind ja außerordentlich einfach. Das Urknallmodell gibt die astronomischen Beobachtungen erstaunlich gut wieder. Aber es zeigt die frappierende Eigenschaft, dass es in der Vergangenheit einen singulären Zustand gab, den Anfang der Zeit. Das sagt die Grenzen der Gültigkeit dieses Modells und der Gravitationstheorie voraus. Wir hoffen aber, dass eine Verbindung von Gravitationstheorie und Quantenphysik uns einmal auch Aussagen über diesen Anfangszustand liefert.

Spektrum: Und was für Aussagen erwarten Sie über die Zeit?

Börner: Es ist ja so, dass die Zeit zu Beginn nicht so absolut gegeben ist wie im Alltag. Zeit entsteht im Urknall zusammen mit dem Raum. Das ist doch eine Idee, die nahe dran ist an theologischen Überlegungen, wie etwa bei Augustinus. Er sagte, als Gott die Welt erschuf, befand er sich nicht in der Zeit, sondern außerhalb von Raum und Zeit.

Spektrum: Welche Aussagen vom Schöpfungsakt sollten denn Naturwissenschaftler und Theologen jeweils voneinander zur Kenntnis nehmen?

Küng: Auch ich halte das Urknallmodell für eine großartige Errungenschaft, weil es empirisch so stark fundiert ist.

Börner: Aber es hat auch diese Ränder, wo es seine Grenzen selbst aufzeigt.

Küng: Mich interessieren hier nicht diese innerkosmischen Grenzen, die kann und sollte die Physik noch weiter ausdehnen. Mir geht es um den Punkt, wo Sie sagen, wir sind »nahe dran«. Für Leibniz war die Grundfrage der Philosophie: Warum gibt es etwas und nicht nichts? Warum gab es einen Urknall statt keinem?

Spektrum: Hat diese Frage denn überhaupt einen Sinn?

Börner: Es ist wirklich schwierig, diese Frage von der Physik her mit Sinn zu erfüllen. Denn wir gehen natürlich davon aus, was uns gegeben, was faktisch da ist. Die Frage nach der Begründung, warum es diesen Urknall gab, liegt jenseits der Physik. Ein unerklärbarer Rest bleibt.

Spektrum: Kommt denn die Religion da weiter?

Küng: Ich will keineswegs einen Gottesbeweis führen. Die meisten Wissenschaftler und Theologen bekennen sich zu Kant, der sagte, dass Fragen, die außerhalb von Raum und Zeit liegen, den Horizont unserer Erfahrung überschreiten.

Spektrum: Worüber sprechen wir dann?

Küng: Die »reine« theoretische Vernunft, wie Kant das nennt, ist für transempirische Fragen nicht mehr zuständig, sondern die praktische Vernunft; ich spreche da lieber von vernünftigem Vertrauen. Wir stehen hier durchaus vor religiösen Fragestellungen.

Börner: Das kosmische Modell zeigt uns eigentlich sehr deutlich die Beschränktheit, der wir unterliegen. Naturwissenschaftler können die Welt nur innerhalb von Raum und Zeit ordnen. Daran sieht man aber die Möglichkeit, dass es vielleicht auch andere Ordnungen geben könnte, die wir mit der naturwissenschaftlichen Methode nicht erfassen. Das finde ich doch wesentlich, weil es Hemmnisse beseitigt, die man sonst gegenüber religiösen Vorstellungen aufbauen könnte.

Küng: Das freut mich. Denn einige Ihrer Kollegen bekennen sich als Materialisten und können sich über Religion oft nur ironisch äußern. Auch Naturwissenschaftler sollten über Religion etwa so kundig sprechen wie ich als Theologe über Naturwissenschaft.

Spektrum: Sie beide benutzen oft Metaphern, oft die gleichen Worte, die aber offenbar ganz Verschiedenes bedeuten. Selbst Kosmologen wie Stephen Hawking sprechen ja gerne von Gott. Welche Rolle spielt die Sprache beim Dialog zwischen Wissenschaft und Religion?

Börner: In populären Sachbüchern ist das eine Art Sport. Es wird versucht, ein alles umfassendes Weltbild zu entwickeln. Da liegt es nahe, theologische Begriffe zu verwenden. Aber das hat keine tiefere ▷

▷ Bedeutung. Wenn Hawking sagt, jetzt sei Gott nicht mehr nötig, weil er Anfangsbedingungen habe, die keinen Urknall mehr erfordern, dann ist das nicht wirklich ernst zu nehmen.

Küng: Das finde ich auch. Nur fallen viele darauf herein, weil Naturwissenschaftler hier die Autorität ihres eigenen Fachs in Anspruch nehmen, um plötzlich theologische, philosophische oder ethische Aussagen zu machen. Erfreulicherweise hat sich Hawking kürzlich korrigiert.

Börner: Das sind Grenzüberschreitungen, die eben verführerisch sind, das ist auch menschlich. Aber dennoch sollte man diese Grenze nicht so absolut sehen, als könne man gar nicht miteinander reden, weil die Sprache ja so verschieden sei oder die Begriffe nicht zueinander passen. Hier kann man im Dialog, wie wir hier, Fortschritte machen.

Spektrum: Halten Sie es für möglich, dass Begriffe aus der Physik auch in der Theologie nützlich sein können?

Küng: Nehmen wir ein Beispiel. Beim Begriff »Licht« etwa interessiert mich natürlich, was die Physik darüber weiß – als Gebilde, das Welle und Teilchen zugleich ist, also komplementäre Eigenschaften hat. Das schließt aber nicht aus, dass ich Licht auch als Metapher in der Religion verwende. Es eignet sich zur bildhaften Beschreibung der komplementären Eigenschaften Gottes, etwa Gerechtigkeit und Barmherzigkeit.

Börner: Ich würde noch weiter gehen. Die moderne Physik zeigt uns ja eine Welt, die wesentlich seltsamer ist als in der mechanistischen Vorstellung des 19. Jahrhunderts. Die Wirklichkeit, die man da erkennt, ist weit entfernt vom naiven Rationalismus, den man aus den Alltagserfahrungen gewinnt.

Spektrum: Haben Sie auch ein Beispiel?

Börner: Bleiben wir beim Begriff Licht. An das Konzept der Welle haben wir uns gewöhnt, aber es ist doch merkwürdig: Es ist eine reine Form, die auf materielle Teilchen wirkt, sich aber ohne ein materielles Medium durch Raum und Zeit fortpflanzen kann. Andererseits besteht Licht aus Lichtquanten. Die Zeit, die für diese Lichtteilchen vergeht, ist gleich null, für sie vergeht überhaupt keine Zeit. Sie wurden vor Jahrmilliarden in einer fernen Galaxie ausgesandt und dann hier mit einem Fernrohr eingefangen.

Aber für diese lichtschnellen Teilchen vergeht keine Eigenzeit, wie wir sagen. Für sie passiert alles gleichzeitig, sie sind immer in der Gegenwart. Ein nicht mit Materie behaftetes Ding erfährt keine Zeit. Das finde ich schon verblüffend.

Spektrum: Und was hat das noch mit Religion zu tun?

Börner: Vielleicht nichts direkt. Aber hier gibt es doch Konzepte in der modernen Physik, die man sehr gut als Metaphern in der Theologie verwenden könnte, auch die erwähnte Komplementarität. Da sind Objekte zugleich Welle und Teilchen, haben also konträre Eigenschaften. Schon in dieser eingeschränkten physikalischen Welt gibt es solch merkwürdigen Dinge.

Küng: Mir gefällt, dass auch die Physik mit Metaphern arbeitet. Über die kleinsten Einheiten etwa, die Quarks, kann man offenbar nur in Metaphern sprechen oder mit mathematischen Formeln.

Spektrum: Wie sehen Sie beide, als Theologe und als Kosmologe, Ihren Zugang zur Wirklichkeit?

Börner: In der Physik als Beispiel für die Naturwissenschaften wollen wir über die Welt, die wir vorfinden, durch Theoriebildung und Experiment etwas herausfinden. Vorhersagen sind dabei nicht einmal das Wichtigste. Vor allem will man eine Orientierung bekommen und Zusammenhänge erkennen.

Spektrum: Herr Küng, nichts anderes will doch die Religion auch, oder?

Küng: Uns Theologen ist an Grundorientierung und Gesamtzusammenhängen gelegen. Die Methodik ist dabei grundverschieden. Wir gehen immer von einem Zentrum aus, der religiösen Botschaft, der Offenbarung. Von diesem Zentrum aus betrachtet der Theologe die Wirklichkeit, und das ist doch dieselbe Welt, die der Physiker vor sich sieht. Darum sollten The-

»Licht« eignet sich zur bildhaften Beschreibung der komplementären Eigenschaften Gottes

Der katholische Theologe Hans Küng ist emeritierter Professor für Ökumenische Theologie der Universität Tübingen und Präsident der Stiftung Weltethos. Er ist Autor zahlreicher Publikationen und Bücher, darunter von »Das Christentum. Die religiöse Situation der Zeit«, »Credo«, »Der Islam. Geschichte, Gegenwart, Zukunft« sowie zuletzt »Der Anfang aller Dinge – Naturwissenschaft und Religion« (alle im Piper Verlag, München).

Der Kosmologe und Astrophysiker Gerhard Börner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und Professor an der Universität München. Er publizierte zuletzt »Kosmologie« (Fischer-Verlag, Frankfurt 2002) sowie »The Early Universe, Facts and Fiction« (Springer, Berlin 2003). Noch in diesem Jahr erscheint von ihm »Schöpfung ohne Schöpfer? – das Wunder des Universums« (DVA, München).

ologen alles zur Kenntnis nehmen, was die Wissenschaft erforscht hat.

Spektrum: Im Gegensatz zur Physik wähnt sich die Religion aber doch im Besitz der Wahrheit.

Küng: Selbstverständlich wäre es gefährlich, zu sagen, Theologen besäßen die Wahrheit. Sie können sich der Wahrheit annähern. Gerade wenn es um die letzte Wahrheit geht, die Wahrheit Gottes, gerät auch die Theologie an ihre Grenzen.

Börner: In der Physik sind die Hypothesen, die man macht, dem Experiment ausgesetzt. Wenn das dann zu Widersprüchen führt, werden sie durch neue Hypothesen ersetzt. In der Theologie müssen ja bestimmte Glaubenssätze als unverzichtbar gelten, als Dogma.

Küng: Der erste Satz des Kredo lautet »Ich glaube an den einen Gott, Schöpfer des Himmels und der Erde«. Es stimmt, dass wir von der Offenbarung ausgehen wie ein Jurist von der Verfassung, er will ja keine neue Verfassung schreiben, so auch der Theologe keine neue Offenbarung. Doch wenn man solche Dogmen nur wiederholen könnte und nicht befragen und interpretieren dürfte, wäre das ein fundamentalistisches Missverständnis. Ich kann ja nicht für das Verständnis von Christi Himmelfahrt von einem vormodernen Begriff von Himmel ausgehen oder im Zusammenhang mit Weihnachten einfach biologisch von Jungfrauengeburt reden wie einst.

Spektrum: Die Physik hat doch aber genauso ihre absoluten Wahrheiten. Newtons Gravitationsgesetz wird ja nicht morgen geändert.

Börner: Auch in der Physik nähern wir uns der Wahrheit an, die Naturgesetze sind das Absolute und nicht die schöne Welt der Erscheinungen. Dabei soll niemals an übernatürliche Erklärungen appelliert werden. Damit kommt man so weit, wie man eben kommt, im Übrigen kommt man erstaunlich weit.

Küng: Wenn man in den Bereich des Metaempirischen kommt, braucht es ein völliges Umdenken. Wenn ich etwa sage »Gott ist die Liebe«, dann muss der Begriff »Liebe« interpretiert und neu gedeutet werden.

Börner: Physiker wie Heisenberg, die durchaus auch gläubig waren, suchten nach einem Urgrund aller Naturgesetze, was allem als Basis dient. Natürlich nur als Extrapolation naturwissenschaftlicher Überlegungen, aber es trifft sich nach meinem Gefühl mit der Theologie.

Das berührt einen sehr grundsätzlichen Punkt. Die Physik hat nämlich eine Schwierigkeit mit ihrem Zugang zur Welt, sie als etwas objektiv Gegebenes zu betrachten. Ein verständliches Bild zu gewinnen gelingt ihr nur um den Preis, die Person, das Subjekt, das Ich auszuklammern. So kommt nach Konstruktion im naturwissenschaftlichen Weltbild Gott nicht vor, genauso wenig wie ich selbst. Das Subjekt, was mich ausmacht, ist vielleicht nach der Hirnforschung eine Selbsttäuschung. Aber wenn es keine Täuschung ist, dann müsste es doch einen Bezug zu dem haben, was die Religion mit Gott bezeichnet.

Küng: Wenn Heisenberg von Urgrund spricht, hoffe ich, dasselbe zu meinen wie er. Der Unterschied kommt auf, wenn etwa die Bibel von einem handelnden Gott spricht. Damit haben Naturwissenschaftler sicher ihre Probleme. Wir versuchen nicht unbedingt, theologische Begriffe mit naturwissenschaftlichen zu erklären. Aber umgekehrt wird ein Astronaut, der auf der Raumstation die Bibel liest, sich vielleicht auch die Fragen nach dem Sinn des Ganzen, nach Gut und Böse stellen.

Spektrum: Sind Sinnfragen nur außerhalb der Naturwissenschaft beantwortbar? Die Wissenschaft beschafft die Fakten, Religion ihre Bedeutung?

Börner: Das wird zwar gerne gesagt. Aber die Wissenschaft entwirft Bilder, etwa vom kosmischen Kreislauf, wo wir Sternenstaub seien und jedes Kohlenstoffatom unseres Körpers in Sternen entstand, oder Darwins Evolutionstheorie, wonach der Mensch Teil der biologischen Entwicklung ist. Diese Bilder liefern ebenfalls Bedeutung für den Menschen.

Küng: Selbstverständlich vermag die Abstammungslehre zu beschreiben, warum etwa die Konstruktion des Auges möglich und sinnvoll war. Da braucht man keinen göttlichen Eingriff zu postulieren. Ich be- ▷

Die Physik gewinnt ein verständliches Weltbild nur um den Preis, das Selbst auszuklammern

▷ haupte nicht, dass nur die Religion Bedeutungen liefert und die Naturwissenschaft nicht. Die Religion kümmert sich jedoch um die ersten und letzten Dinge, um Ursprung und Sinn des Ganzen, des Kosmos wie des Menschen.

Spektrum: Beim Urknall geht das ja zunehmend nur noch mit kaum mehr beweisbaren physikalischen Theorien. Wie sehen Sie die Rolle der Spekulation in diesen Betrachtungen?

Börner: Dieses spekulative Vorgehen ist einfach die Methode, mit der man Fortschritte erzielt. Zuerst steht immer eine Vorstellung, die experimentell geprüft wird. Auch beim Urknall versucht man sich vorzustellen, was die so genannte Stringtheorie über den Anfangszustand aussagt. Da kommt man auf eine sehr hohe Anzahl von Möglichkeiten, die alle zu einem eigenen Universum führen können. Wenn es gelingt, eine dieser Möglichkeiten mit unserem bekannten Universum zu identifizieren mit all seinen Fundamentalkonstanten und Kräften, das wäre schon ein starker Hinweis, dass man hier eine Wahrheit erkannt hat.

Küng: Das sind legitime Überlegungen, mathematische Modelle, die aber nicht mit der Wirklichkeit verwechselt werden sollten. Hat das alles noch eine empirische Grundlage?

Börner: Die Verankerung in der Realität dieser Modelle ist natürlich sehr locker. Aber selbst solch verwegene Thesen dienen der Orientierung. Man möchte eben nicht aufgeben und etwa nur sagen, das Universum ist so, wie es ist, weil wir hier sind. Es ist wichtig, die Grenzen weiter zu verschieben, auch spekulativ.

Küng: In der Theologie sind wir mit dem Begriff Spekulation recht zurückhaltend geworden, vor allem seit er in Verruf geraten ist. Heute bezeichnet er oft kaum mehr als völlig willkürliche Konstruktionen, das war bei Hegel noch anders. Ich spreche lieber von Reflexion, da wir schließlich für unseren Glauben eine rationale Rechtfertigung abgeben wollen.

Spektrum: Gibt es denn eine rationale Theologie?

Küng: Wenn man rational nicht als rationalistisch, sondern als vernünftig versteht, ja. Die Vernunft bleibt nicht den Naturwissenschaftlern überlassen, auch Theologen sollten jeden ihrer Schritte begründen können.

Spektrum: Ist diese Annäherung zwischen Wissenschaft und Religion nicht doch nur rhetorischer Schein, oder ist das substanzieller?

Börner: Für mich besteht schon eine enorme Spannung zwischen religiösen Überlegungen und unserer Naturbeschreibung. Wenn ich mich selbst sehe, dann bin ich ein System aus Atomen und Elektronen, bei denen jeder Zustand den nächstfolgenden bestimmt, entweder streng kausal oder nach Gesetzen der Wahrscheinlichkeit. Das läuft dahin wie eine biologische Maschine. Tief im Innern bin ich aber überzeugt, dass das nicht alles ist.

Jeder kennt seine Grenzen und weiß, dass er nicht alles weiß

Spektrum: Was soll da noch sein?

Börner: Da ist noch ein Rest, den ich schlecht beschreiben kann. Meinem Gefühl nach besteht diese Spannung zwischen physikalistischer Weltbeschreibung und Theologie. Ich kann das Ich, das ich mir vorstelle, für eine Illusion halten, aber das muss nicht so sein. Da sollte man diese Spannungen aushalten und sich nicht vorschnell mit irgendwelchen Einigungen zufrieden geben. Tatsache ist doch, dass das naturwissenschaftliche Weltbild dieses Manko hat, dass das denkende Subjekt, also der Geist, darin nicht vorkommt. Denn ich kann keine nicht naturgesetzlich bedingten Einflüsse zulassen. Da sehe ich das große Manko.

Küng: Für mich ist das eine sehr reale Annäherung, gerade weil ich weiß, dass die beiden Sphären sehr verschieden sind. Ich bin nicht bereit, wieder alte Konfrontationen aufzuwärmen, aber auch nicht, einfach nur zu harmonisieren. Das gilt für beide Seiten: ebenso für gewisse Theologen, wenn sie versuchen, Elemente aus der Naturwissenschaft herauszuziehen, etwa für ein »Intelligent Design« wie für Naturwissenschaftler, die Elemente der Religion beliebig benützen. Ohne einander etwas Falsches abzufordern, können wir uns doch verstehen, weil jeder die eigenen Grenzen kennt und weiß, dass er nicht alles weiß. Naturwissenschaft liefert mir viele Antworten auf wichtige Probleme. Zugleich bin ich froh, dass ich von der Religion Aussagen auf die großen Fragen des Lebens bekomme.

Spektrum: Welche sind das?

Küng: Nun, woher komme ich, wohin gehe ich? In ein Nichts hinein oder in eine letzte Wirklichkeit? Warum gibt es Gutes und Böses? Warum ist es besser zu lieben als zu hassen? Das geht auch den Naturwissenschaftler an, wenn er abends vom Labor nach Hause kommt. Da kann man nur einladen, sich darauf einzulassen, sich zum Beispiel darauf zu verlassen, dass mit dem Tod nicht alles aus ist.

Dafür gibt es keine rationalen Beweise, aber Gründe eines vernünftigen Vertrauens, warum ich dieser Meinung bin. Berichte von Nahtoderlebnissen geben mir nur einen Teil der Informationen. Ich möchte wissen, was hinter der Tür ist. Da gibt die Religion einen Trost, der alle Vernunft übersteigt. Und daher weiß ich, das Ganze hat für mich einen Sinn, selbst wenn ich im Leben auch Erfahrungen von Sinnlosigkeit gemacht habe.

Börner: Was Sie sagen, macht den Unterschied deutlich. Das Wissen, das Naturforscher gewinnen, ist unbestechlich. Es hängt nicht davon ab, dass ich etwas Bestimmtes lieber anders hätte, da ist nichts abstimmbar. Den physikalischen Gesetzen muss ich nicht vertrauen, die sind einfach da. Sie gelten, ob ich will oder nicht. Das ist in der Religion ganz anders. Es wäre ein Fehler, religiöse Begriffe in physikalische zu übersetzen, um etwa eine physikalische Religion zu konstruieren. Das ginge schief.

Küng: Das hat doch einen wunderbaren Aspekt von Freiheit. In der Religion wird niemand zu etwas gezwungen. Ich kann zwar sagen, dass die Evolution einen Sinn hat. Aber den kann ich nicht aus der Evolutionstheorie allein ableiten. Da ist jeder frei. Wenn jemand sagt, er kann mit Gott nichts anfangen, dann liegt das für mich auf der Ebene: Ich kann mit Mozart nichts anfangen. Ein bisschen Anstrengung ist schon erforderlich, ob bei Mozart, der Naturwissenschaft oder bei Gott. Biertischtheologie ist nicht die Lösung.

Spektrum: Herr Küng, Herr Börner, herzlichen Dank für das Gespräch. ◁

Die Diskussion führten
***Reinhard Breuer** und **Götz Hoeppe** von*
Spektrum der Wissenschaft.

UNTERWASSERFOTOGRAFIE

Claudia und Manfred Hochleithner

Underwater Universe

Edition Reuss, München 2005. 144 Seiten, € 49,90

Die technische Ausrüstung des Fotografenehepaares Hochleithner geht schon etwas über den Standard des Tauchurlaubers hinaus: Makroobjektive und Blitzlicht bringen das Gewicht auf über 30 Kilogramm. Aber das ist nicht das Entscheidende. Mit langjähriger Erfahrung, der Hilfe einheimischer Tauch-Guides und viel Geduld und Zähneklappern – Stunden bewegungslos im Wasser zuzubringen kühlt den Körper stark aus – ist es ihnen gelungen, die unglaublichsten Meerestiere vor die Linse zu bringen.

Der bei Unterwasseraufnahmen übliche Blauschleier weicht knallbunten Rot- und Orangetönen: Nur ein Blitzlicht aus nächster Nähe bringt die Originalfarben der Objekte heraus. Erst das Nachblättern im Erläuterungsteil ganz hinten klärt den erstaunten Betrachter darüber auf, dass die spektakuläre »Imperatorgarnele auf Seegurke« gerade mal anderthalb Zentimeter lang ist. Der knubbelige Rundflecken-Anglerfisch, der sich wie ein trotziges Kleinkind mit seinen kleinen Stampferfüßen am Boden abstützt, ist auch nur doppelt so groß. Was so aussieht, als hätte Niki de Saint-Phalle einen bunten Stier ins Korallenriff versenkt, ist eine fünf Zentimeter lange Prachtsternschnecke. Zwei Pygmäenseepferdchen haben sich mit den Schwänzen festgeringelt – aber nicht aneinander, sondern an den Ästen einer Koralle, die ihnen, leuchtend rot gefärbt und mit pickelartigen Auswüchsen, zum Verwechseln ähnlich sind.

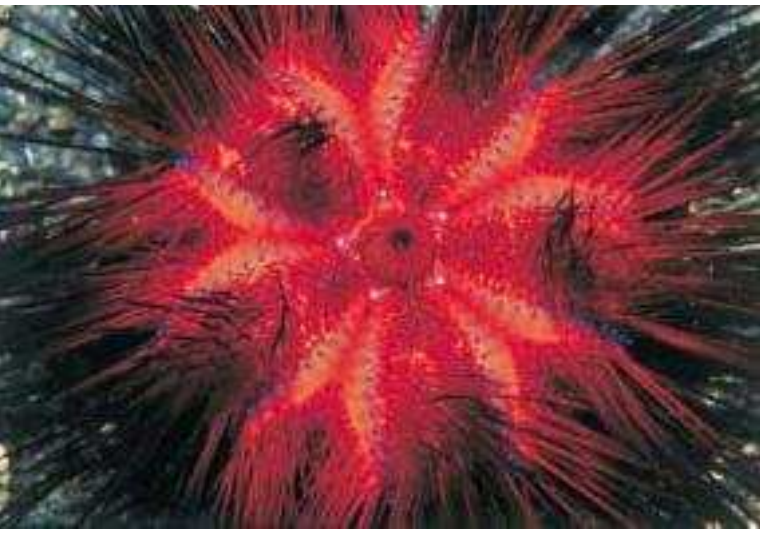
Manche Tiere sind so klein, dass sie der Aufmerksamkeit der Zoologen weit gehend entgangen zu sein scheinen; jedenfalls ist die Einordnung einiger der abgebildeten Tierchen auch den Fachleuten nicht gelungen.

Der (dreisprachige) Text beschränkt sich auf einleitende Worte und einen sehr knappen Erläuterungsteil am Schluss. Hier kann man einfach die Bilder auf sich wirken lassen – und was für Bilder!

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

Links oben Warzenschnecke, rechts oben junger gelb-brauner Kofferfisch, links unten Seeigel, rechts unten drei Prachtsternschnecken: Alle Tiere leben in indonesischen Gewässern; nur der Seeigel ist größer als vier Zentimeter.



NEUROBIOLOGIE

Gary Marcus

Der Ursprung des Geistes

Wie Gene unser Denken prägen

Aus dem Amerikanischen von Christoph Trunk.
Walter, Düsseldorf 2005. 310 Seiten, € 34,90

Nach dem letzten Stand des Humangenomprojekts besitzt der Mensch rund 30 000 Gene. Unser Gehirn enthält jedoch an die 100 Milliarden Neuronen. Wie kann eine so geringe Zahl an Genen eine derartige Vielfalt an Nervenzellen und die damit einhergehende Komplexität des Denkens kreieren?

Der New Yorker Entwicklungspsychologe Gary Marcus erklärt in seinem neuen Buch diese »Genknappheit« *(gene shortage)* zum Scheinproblem. Das Genom ist eben kein Bauplan im Sinne einer Blaupause, sodass ein Gen für genau einen Schaltkreis zuständig wäre. Nach Marcus sollte man sich Gene eher als eine Art Rezept vorstellen, als Anleitung, die den betroffenen Nervenzellen (wie allen anderen Körperzellen auch) einen gewissen Handlungsspielraum lässt.

Dabei unterscheidet Marcus eine Wenn- und eine Dann-Region eines Gens. In der Dann-Region sind die Anweisungen für die Kodierung von Proteinen gespeichert, während die Wenn-Region bestimmt, ob und wann die entsprechende Region eines Gens abgelesen, das heißt, ob und wann ein »Rezept« auf der Dann-Region realisiert wird. Da die regulatorische Wenn-Region eines Gens direkt oder indirekt auch von Proteinprodukten anderer Gene moduliert werden kann, existiert zwischen sämtlichen Genen eines Genoms ein komplexes Netz von Wechselbeziehungen, die dem System eine hohe Flexibilität verleihen.

Diese Wechselbeziehungen sind entscheidend, denn ein Gen arbeitet selten allein. Für jede Hirnzelle wirken wahrscheinlich mehrere tausend Gene zusammen, und jedes von ihnen hat in der Regel nicht nur eine, sondern zahlreiche Funktionen. Mit Hilfe eines komplexen Regulationssystems entstehen aus einem nur wenig variierten Rezept ganz andere Körperteile: Ein Tier mit 60 Beinen benötigt nicht unbedingt zehnmal so viele Gene wie ein sechsbeiniges, der menschliche Arm zu seiner Entwicklung keinen völlig anderen Gensatz als das Bein. Das gilt auch für die einzelnen Komponenten des Gehirns.

Die Flexibilität von Genen könnte auch erklären, so Marcus, warum Mensch und Schimpanse, die auf Grund ihrer langen gemeinsamen Evolution immerhin 98,5 Prozent ihres Genoms gemeinsam haben, dennoch so unterschiedlich sind. Der Hauptunterschied besteht offensichtlich nicht in der genetischen Buchstabenfolge, also im »Rezeptteil«, sondern darin, welche Gene zu welchem Zeitpunkt angeschaltet werden, also in der Organisation des Genoms.

Dieser anderen Organisation haben wir unter anderem unsere Sprachfähigkeit zu verdanken – ein Thema, mit dem Marcus sich auskennt: Er promovierte schon mit 23 Jahren bei dem renommierten Kognitionsforscher Steven Pinker und kam über die Erforschung des Spracherwerbs bei Kleinkindern zur Genetik. Welche Sprache wir allerdings lernen, wird nicht durch unsere Gene, sondern durch unsere alltägliche Erfahrung bestimmt. Nicht nur in der Sprache, sondern in unserem ganzen Verhalten sind die Einflüsse von Genetik und Umwelt untrennbar vermischt, womit sich nach Ansicht des Autors die alte Debatte über die Bedeutung von Vererbung und Umwelt erledigt hat. Lernen und Erfahrung sind es, die unser Gehirn immer wieder neu strukturieren – nicht nur bis zur Pubertät, sondern unser ganzes Leben lang.

Die Übersetzung ist insgesamt gut gelungen, weist aber Schwächen in der Fachterminologie auf. So ist mit »Hinterhirn« das Rautenhirn *(hindbrain)* gemeint, und bei »Sodium«-Kanälen zuckt jeder Neurophysiologe zusammen. Da sich der Text flüssig liest und der Übersetzer es verstanden hat, den leichten Ton des Originals ins Deutsche zu übertragen, ist es umso bedauerlicher, dass hier am Fachlektorat gespart wurde.

Monika Niehaus

Die Rezensentin ist promovierte Biologin mit Fachgebiet Neurophysiologie und freie Autorin und Übersetzerin in Düsseldorf.

GEOLOGIE

Wolfgang Frisch (Text) und Martin Meschede (Bilder)

Plattentektonik

Kontinentverschiebung und Gebirgsbildung

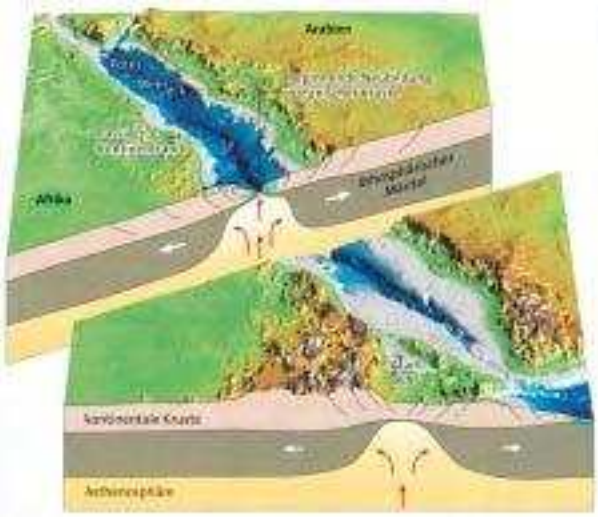
Primus, Darmstadt 2005. 196 Seiten, € 39,90

Eigentlich bewegen sich die Kontinentalplatten der Erde sehr langsam. Gleichwohl hat die Theorie dieser Bewegungen, die Plattentektonik, die aus der Kontinentverschiebungstheorie des Meteorologen Alfred Wegener (1880 – 1930) hervorgegangen ist, immer wieder Neuigkeiten zu bieten. Es handelt sich vor allem um Naturkatastrophen wie Vulkanausbrüche oder Erdbeben.

Wolfgang Frisch, Professor für Geologie in Tübingen, hat bereits 1986 zusammen mit Jörg Loeschke ein Buch namens »Plattentektonik« geschrieben. Der aktuelle Band ist eine neu verfasste und um viele neue Erkenntnisse erweiterte Version. Frischs Greifswalder Fachkollege Martin Meschede lieferte die Abbildungen. Neben einem Glossar am Ende des Buchs ergänzen konkrete regionale Beispiele und zahlreiche Schaubilder die Informationen.

Nach einem Überblick über die Forschungsgeschichte geht der Autor im Einzelnen darauf ein, wie sich verschiedene Plattenbewegungen auswirken. Grabenbrüche und mittelozeanische Rücken entstehen dadurch, dass die Erdkruste gezerrt wird, dadurch immer dünner wird und teilweise aufreißt, während Gebirge – unter anderem – dadurch gebildet werden, dass sich eine Platte unter eine andere schiebt. »Heiße Flecken« (Hotspots) entstehen im Gegensatz zu anderen Vulkanen durch heiße Mantelströme, so genannte Diapire, die fingerförmig bis an die Erdoberfläche empordringen.

Zuweilen legt ein Stück Erdkruste einen weiten Weg zurück, bevor es mit einem anderen Kontinent kollidiert und mit ihm verschmilzt. Ein solcher »Fremdkörper« in einem Kontinent, ein so genanntes Terran, ist nicht ohne Weiteres als solcher zu erkennen. Eine Nachweis-



Die Arabische und die Afrikanische Platte driften auseinander; dabei reißt der Graben des Roten Meers auf. Unter dem Afar-Dreieck treffen sternförmig drei Grabenbrüche zusammen, dort ist die Kruste jedoch nicht durchgerissen.

methode ist die Paläomagnetik: Das Erdmagnetfeld hat dem Gestein bei dessen Entstehung eine magnetische Orientierung aufgeprägt, aus der die geografische Breite des Entstehungsorts erkennbar ist. Das Terran nimmt diese Orientierung bei seiner Wanderung mit, ebenso wie seine Sedimente samt eingelagerten Fossilien. Terrane wurden beispielsweise in den Rocky Mountains und der Küstenkordillere der USA und Kanadas sicher ermittelt.

Der Autor beschreibt hier ein für mich völlig neues Thema, das mich daher umso mehr interessiert. Das Kapitel ist ebenso wie die anderen Beiträge in dem Buch gut und übersichtlich strukturiert. Allerdings hatte ich als Nicht-Geologin mit der wissenschaftlichen Ausdrucksweise schon etwas zu kämpfen.

Die beiden Professoren möchten neben Studierenden auch einen »breiten, naturwissenschaftlich interessierten Leserkreis« ansprechen, der über »kein geologisches Spezialwissen« verfügt. Die notwendigen Begriffserklärungen liefern sie mit; dies hat jedoch zur Folge, dass einige Sachverhalte recht ausführlich dargestellt werden und man sich beim Lesen schon mal in Details verliert.

»Wissensvermittlung auf hohem fachlichen Niveau« hat sich der Primus-Verlag zum Ziel gesetzt, und diesem Anspruch wird das Buch auf jeden Fall gerecht. Laien, die hier Neuland betreten, könnten ein wenig Mühe haben.

Sigrid Peters

Die Rezensentin hat Ethnologie in Heidelberg studiert und ist freie Journalistin in Karlsruhe.

SOZIOLOGIE

Peter Winterhoff-Spurk

Kalte Herzen

Wie das Fernsehen unseren Charakter formt

Klett-Cotta, Stuttgart 2005. 272 Seiten, € 19,50

Dieses Buch verschaffte mir ein merkwürdiges Wiedersehen mit zwei Denkmustern, die mir in meiner Jugendzeit heftig zu schaffen gemacht haben. Erstens: »Die Jugend von heute ist verdorben, früher war alles besser«, manchmal mit der Steigerung »Unter dem Führer hätte es das aber nicht gegeben«. Zweitens: »Du als Einzelmensch bist hilfloses Opfer anonymer gesellschaftlicher Kräfte, die dich manipulieren, bis du etwas für normal hältst, was du eigentlich nie gewollt hast.«

Mittlerweile haben beide Sprüche für mich ihren Schrecken verloren. Nicht in erster Linie, weil sie widerlegt worden wären, sondern weil sich ihre Bedeutung als begrenzt herausgestellt hat. Das kann schon sein, dass wir als Jugendliche schlechter erzogen waren als unsere Eltern – was immer das heißen mag –; aber mit meinen mittlerweile erwachsenen Altersgenossen habe ich deswegen keine ernsthaften Probleme. Es ist auch richtig, dass die gesellschaftlichen Leitbilder Moden folgen, die mir häufig überhaupt nicht passen. Nur habe ich inzwischen erlebt, dass diese Moden mir persönlich ausreichend Freiheit lassen – auch wenn ich für diese Freiheit gelegentlich bezahlen muss.

Wie kommt es dann, dass Peter Winterhoff-Spurk diese längst erledigt geglaubten Sprüche in meinem Kopf wieder zum Leben erweckt? Wohlgemerkt: Die Sprüche selbst stehen nicht in dem Buch. Der Autor ergeht sich weder in konservativem Weltschmerz noch in vulgärlinken Spekulationen über irgendwelche militärisch-industriellen Finsterlinge, die uns um des schnöden Profits willen einer kollektiven Gehirnwäsche unterziehen. Winterhoff-Spurk, Professor für Psychologie in Saarbrücken, teilt uns zunächst seine und seiner Fachkollegen Beobachtungen zum Thema Medienpsychologie mit.

Den einen Teil dieser Beobachtungen kann man mühelos am eigenen Fernseher nachvollziehen. Die Sendungen werden kurzatmiger, oberflächlicher und immer stärker auf die Inszenierung einer Einzelperson konzentriert. Während ein Politiker 1985 durchschnittlich 92 Sekunden am Stück Zeit hatte, seine Gedanken mitzuteilen, waren es 1998 gerade noch 23 Sekunden. Talkshows, inszenierte Gefühlsaufwallungen wie die »Traumhochzeit«, deren Moderatorin Linda de Mol eine Art Leitfigur des Buchs ist, und Pseudoeinblicke ins Intimleben wie »Big Brother« schießen ins Kraut.

Das bleibt zweifellos nicht ohne Wirkung auf den Zuschauer. Noch 1990 pflegte der deutsche Durchschnittsmensch täglich zwei Stunden und fünfzehn Minuten fernzusehen; diese Zeit ist in nur fünfzehn Jahren auf dreieinhalb Stunden angewachsen und liegt damit nur noch eine Stunde unter dem amerikanischen Standard. Kein Wunder, dass vor allem die Kinder und Jugendlichen ihre Rollenvorbilder in immer größerem Maß aus dem Fernsehen beziehen, selbst hektisch, zappelig und oberflächlich werden und vorzugsweise auf einzelne erregende Events und die Darstellung des eigenen Äußeren abfahren.

So weit der zweite Teil der Beobachtungen, die durch sorgfältig durchgeführte soziologische Studien belegt werden. In seiner Interpretation geht Winterhoff-Spurk darüber jedoch noch weit hinaus. Das Fernsehen etabliere einen neuen Sozialcharakter, der sich auch deshalb so stark ausbreite, weil er perfekt auf die Anforderungen der neuen Arbeitswelt passe: Flexibilität, ständig neue Aufgaben und Arbeitsumgebungen, beeindruckende Selbstdarstellung statt Aufbau langfristiger Vertrauensverhältnisse. Der Autor gibt diesem Charakter einen eigenen Namen: Histrio, von der altrömischen Bezeichnung für einen Schauspieler, Tänzer oder Musiker. Ein ganzes Kapitel widmet er dem Versuch, zwei Galionsfiguren des deutschen Kinos, Marlene Dietrich und Leni Riefenstahl, per posthumer Ferndiagnose den histrionischen Charakter zu attestieren.

Durch dieses präzise Zusammenwirken des Fernsehens und der in der Arbeitswelt wirksamen Kräfte steuere unsere Gesellschaft auf einen Zustand hin, in

---

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Günter Kröber

Bitte Zahlen!

Unterhaltsame Mathematik

Eulenspiegel, Berlin 2005, 144 Seiten, € 9,90

Mit Klatsch und Skandalgeschichten von Politikern, Adelshäusern und Stars aus dem Showgeschäft werden wir von der Regenbogenpresse mehr als gut versorgt. Wer aber hat jemals über prominente Zahlen berichtet?

Diese schmerzliche Lücke hat jetzt der Mathematiker und Philosoph Günter Kröber geschlossen. »Bitte Zahlen!« ist ein Klatschreport: über das Promipaar 0 und 1, über die skandalösen Quadratwurzeln aus 2 und –1, die Kreiszahl Pi, die natürliche Prominente *e* und die göttliche Prominente Phi.

Kröbers Buch ist mit lockerer Hand geschrieben und amüsant zu lesen. Ein Mathematikstudium ist keine Voraussetzung, um das Buch verstehen zu können; Schulmathematik und gesunder Menschenverstand sind völlig ausreichend.

Aus der Rezension von Heinrich Hemme

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Vermittlung	■■■■
Verständlichkeit	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	23

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen**

dem der histrionische Charakter dominiere. »Trübe Aussichten: ein politisch desinteressierter, gesellschaftlich nicht engagierter, an seinen Arbeitgeber emotional nicht gebundener, psychich labiler, egoistischer, vor allem mit seiner Inszenierung beschäftigter und an Events interessierter Single als Bürger der Zukunft.«

Indem Winterhoff-Spurk alles zusammenträgt, was für seine These spricht, und die bunte Vielfalt der anderen gesellschaftlichen Strömungen weit gehend ausblendet, erscheint der von ihm beschriebene Trend in der Tat als unausweichliches Schicksal. Entsprechend trostlos fällt das Schlusskapitel »Was tun?« aus. Außer der realitätsfernen Idee, es könne ja jeder persönlich seinen Fernseher abschaffen, fällt ihm nicht viel ein. Immerhin gibt er zur Belustigung des Lesers zu, dass seine eigene Fernsehlosigkeit weniger einem heroischen Entschluss als einem Versehen zuzuschreiben ist (Kabelanschluss aus Zorn gekündigt und keinen Ersatz beschafft).

Was soll man davon halten? An den Fakten ist wenig zu rütteln. Das Thema ist auch alles andere als unbedeutend. Gewisse Dinge waren früher wirklich besser, und anonyme gesellschaftliche Kräfte üben tatsächlich eine erhebliche Macht auf den Einzelnen aus. Es ist dem Autor auch nicht vorzuwerfen, dass er sich auf sein Thema konzentriert. Den fatalen Eindruck der Unausweichlichkeit, den er damit als Nebenfolge im Kopf des Lesers erzeugt, muss dieser selbst korrigieren.

Es gibt genug Ausweichmöglichkeiten; sie bestehen nicht nur im Rückzug ins Private. Auch die vorliegende Zeitschrift lebt bis heute, obwohl sie dem Trend zur Kurzatmigkeit nur hinhaltend und widerwillig Folge leistet. Aber gegen den Trend zu schwimmen erfordert, wie üblich, Fantasie und Mühe. Beides wendet nur auf, wer gewisse Erfolgsaussichten sieht. Da soll man sich von einem Buch, das mehr oder weniger aus Versehen fatalistisch geraten ist, den Blick nicht verstellen lassen.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

PHYSIK

Sander Bais

Die Gleichungen der Physik

Meilensteine des Wissens

Aus dem Englischen von Thomas Hempfling.
Birkhäuser, Basel 2005. 96 Seiten, € 24,95

Eine viel zitierte Faustregel lautet: Jede Formel, die in einem Buch auftaucht, halbiert die Anzahl der Leserinnen oder Leser. Nehmen wir an, alle gut 82 Millionen Einwohner Deutschlands würden das vorliegende Buch zu lesen beginnen; dann wären am Ende noch einige hundert Menschen übrig. Denn das Werk stellt siebzehn physikalische Gleichungen oder Gleichungssysteme vor, die Sander Bais, Professor für theoretische Physik in Amsterdam, als die wichtigsten seines Fachs bezeichnet.

Es beginnt mit der mathematischen Beschreibung von Wachstums- und Zerfallsprozessen; dann folgen die Newton'sche Mechanik, die Maxwell'schen Gleichungen des Elektromagnetismus, Thermodynamik, Quantenmechanik, Relativitätstheorie, die elektroschwache Wechselwirkung und schließlich die Stringtheorie. Die jeweilige Gleichung, für die der Autor oft die allgemeinste mathematische Darstellung wählt, steht wie gemalt in weißer Schrift auf karminrotem Grund, während die zugehörigen Erläuterungen sich auf der gegenüberliegenden Seite und den folgenden finden.

Der Verfasser hat den Kapiteln für die Gleichungen einen »tautologischen Werkzeugkasten« vorangestellt, der die gebräuchlichsten mathematischen Notationen und einen kurzen Überblick über die wichtigsten Regeln der Vektor- und Differenzialrechnung enthält. Aber das hilft nicht viel. Noch weitaus mehr Vorwissen wäre nötig, um den Ausführungen des Physikprofessors folgen zu können. Häufig fühlte ich mich in meine Studienzeit zurückversetzt: Da erklärte der Dozent die merkwürdigsten Schlussfolgerungen für trivial, während wir Studenten einige Zeit brauchten, um hinter diese Trivialitäten zu kommen. ▷

▷ Begriffliche Unsauberkeiten kommen hinzu. Ist der Differenzialquotient dr/dt dasselbe wie die Geschwindigkeit v, weil er so definiert wird? Oder weil die Eigenschaften von dr/dt unserer anschaulichen Vorstellung von Geschwindigkeit entsprechen? Der Autor scheint der zweiten Meinung zuzuneigen. Dass man »ohne Zweifel … Arbeit vollständig in Wärme umwandeln« kann, ist zwar richtig, aber dem unbedarften Leser nicht unbedingt klar. Dem wird daher die Fortsetzung des Satzes »aber ob das auch anders herum funktioniert, ist nicht gerade offensichtlich« zur reinen Glaubenssache.

Zu derlei sprachlichen Ungeschicklichkeiten kommen Schreibfehler, Wechsel zwischen alter und neuer Rechtschreibung, Striche in manchen Gleichungen, die nirgends erklärt werden, und eine leicht makabre Zusammenstellung von Sätzen zum Leben Ludwig Boltzmanns (1844–1906), des Entdeckers der Thermodynamik: »Man erzählt, dass Boltzmann 1904 eine Weinflasche in den Berkeley Faculty Club schmuggelte, als Berkeley eine ›trockene‹ Stadt war. Mit 62 Jahren beging er Selbstmord.« Es sieht fast so aus, als hätte der Lektor – mangels Verständnis – sich nicht an Änderungen am Text herangetraut.

Ich fürchte, es sind tatsächlich nur einige hundert Menschen, die sich von dem Buch angesprochen fühlen und es verstehen können. Eigentlich ist das Projekt, die wichtigsten Gleichungen der Physik in einem handlichen Kompendium kurz darzustellen und deren Grundgedanken verständlich zu erläutern, faszinierend. Aber die Ausführung ist dem Autor und dem Verlag nicht gelungen – vielleicht unvermeidlich bei der überaus komplexen Materie.

Gerhard Samulat

Der Rezensent ist Diplomphysiker und freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

KINDERBUCH

Christine Schulz-Reiss

Nachgefragt: Philosophie

Basiswissen zum Mitreden

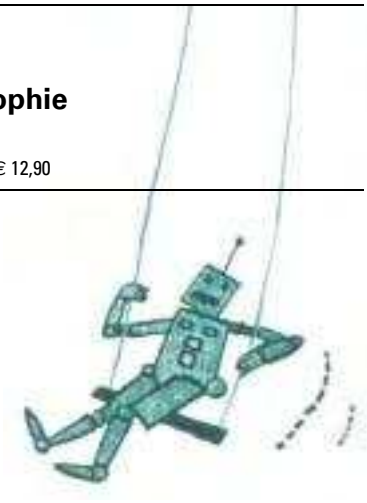
Loewe, Bindlach 2005. 144 Seiten, € 12,90

Eigentlich ist Philosophie für Kinder etwas vollkommen Natürliches. Von den ewigen »Warum?«-Fragen der Vierjährigen bis zu den tief schürfenden Gedanken der Pubertierenden über den Sinn des Lebens – in diesem Alter stellen die Menschen noch Fragen, welche die Erwachsenen längst ad acta gelegt haben. Andererseits ist richtige Philosophie häufig schwere Kost, und man muss den jungen Denkern Brücken bauen. Dabei ist der Grat zwischen notwendiger Vereinfachung und einem Abrutschen ins Banale schmal.

Diese Gratwanderung wagt die freie Journalistin Christine Schulz-Reiss. Mit »Nachgefragt: Politik« (2003) und »Was glaubt die Welt?« (2004) hat sie sich bereits an junge Leser gewandt. In ihrem neuen Buch stellt sie in einfacher Sprache die wichtigsten Philosophen und ihre Theorien vor.

Schulz-Reiss gibt sich alle Mühe, ihre Leser mit lebhaften, kindgerechten Formulierungen und einem übersichtlichen Aufbau bei der Stange zu halten. Umständliche Begriffe werden vermieden, notwendige Ausdrücke gesondert erklärt und in einem Stichwortverzeichnis vermerkt. Ein Glossar der beschriebenen Philosophen erleichtert die Navigation durch das Buch.

Nach einer Einführung in die elementaren Fragen der Menschheit folgen einzelne Kapitel über deren Vordenker, beginnend bei Thales von Milet bis zu Bertrand Russell. Jedem Philosophen wird eine Seite gewidmet. Die durchgängige Nennung der Namen in der Überschrift erleichtert die Suche, ein kurzer Vorspann animiert zur Lektüre. Die zahlreichen Illustrationen lockern die Seiten auf und helfen, abstrakte Themen anschaulich zu vermitteln.



Der Utilitarismus misst des Sinn des menschlichen Handelns an dem Glück, das es einbringt.

Leider wird dieses Verfahren nicht konsequent durchgehalten. So hätte sich das Wettrennen zwischen Achill und der Schildkröte für eine Illustration geradezu aufgedrängt. Stattdessen wird noch nicht einmal der Urheber des Paradoxes, Zenon von Elea, erwähnt. Obendrein ist eine Seite pro Philosoph manchmal zu knapp. Immerhin hat die Autorin Sokrates, Platon, Aristoteles, Locke, Rousseau, Kant und Hegel jeweils mehrere Seiten gegönnt, auf denen sie neben der Relevanz der »Schwergewichte« für künftige Denker auch den Kern ihrer Philosophie erklärt. Ärgerlich ist aber, wenn der kategorische Imperativ Kants verkürzt wird auf die goldene Regel »Was du nicht willst, dass man dir tu, das füg auch keinem anderen zu«. Auch eine Erwähnung des Dualismus von Descartes hätte nicht geschadet.

Während Schulz-Reiss einen sehr guten Überblick über die klassische Philosophie bietet, ist das 20. Jahrhundert deutlich unterrepräsentiert. Zudem drängt sich der Verdacht auf, dass die Auswahl der moderneren Vertreter von persönlichen Vorlieben der Autorin geprägt ist. Zumindest hat die Entwicklung im vergangenen Jahrhundert nicht mit Bertrand Russell geendet. Durch die technischen und medizinischen Fortschritte im 20. Jahrhundert ergeben sich unzählige neue Fragen. Diese werden im Buch kurz angerissen, jedoch nicht erklärt, geschweige

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) wurde bekannt durch den Keks und die Monadentheorie.

denn philosophische Ansichten dazu vermittelt.

Zu dem Namensverzeichnis (»Glossar«) mit Kurzbiografien hätte dringend noch wenigstens je ein Hauptwerk für die weiterführende Lektüre genannt werden müssen. Hilfreich wäre auch gewesen zu erfahren, was die einzelnen Denker neben ihren philosophischen Arbeiten veröffentlicht haben. Die Altersempfehlung von zwölf Jahren ist stark überhöht, die einfache Verständlichkeit dürfte es auch einem aufgeweckten Achtjährigen erlauben, Freude an der Materie zu finden. Das gesonderte Kapitel über Frauen in der Philosophie bietet aber auch erwachsenen Lesern noch interessante Erkenntnisse. Es gab nicht nur Xanthippe, die ihren Mann auf die Straße jagte.

Bei aller Kritik: Die Kapitel sind übersichtlich, treffen meist den Kern des Themas und machen Lust weiterzulesen. Der Band bietet einen guten Überblick über die wichtigsten Vertreter und Gedanken der Zunft. Wer seinen Kindern einen Gefallen tun will, den sie später zu würdigen wissen, ist mit »Nachgefragt: Philosophie« gut beraten.

Stefan Keilmann

Der Rezensent hat Germanistik und Philosophie studiert; er ist freier Journalist in Ludwigshafen.

NEUROWISSENSCHAFT

Joachim Bauer

Warum ich fühle, was du fühlst

Intuitive Kommunikation und das Geheimnis der Spiegelneurone

Hoffmann und Campe, Hamburg 2005. 192 Seiten, € 19,95

Wie kommt es, dass wir das Lächeln einer anderen Person manchmal noch Stunden später in uns tragen? Warum steckt uns schlechte Laune – eines Arbeitskollegen etwa – oft an? Warum spüren wir intuitiv, was unser Partner gerade tut oder empfindet, auch wenn er sich zu dieser Zeit auf der anderen Seite des Erdballs befindet?

Die Antwort auf all diese Fragen sieht der Freiburger Internist und Psychiater Joachim Bauer im Wirken der Spiegelneurone. Als Handlungsneurone sitzen sie in der prämotorischen Hirnrinde und feuern, sobald wir etwas Bestimmtes tun. Aber nicht nur dann: Auch wenn wir uns die entsprechende Handlung nur vorstellen oder sie bei jemand anderem beobachten, werden die Nervenzellen aktiv.

Entdeckt hat die kleinen Wunderzellen Giacomo Rizzolatti von der Universität Parma Anfang der 1990er. In einem Versuch mit Makaken zeigte sich, dass stets ein bestimmtes Neuron feuerte, wenn unser tierischer Verwandter nach einer Erdnuss griff. Und nicht nur das: Auch wenn der Affe eine Person bei gleichem Tun beobachtete oder solches auch nur vermuten konnte, war diese Zelle aktiv. Offenbar, so schlussfolgerten Rizzolatti und seine Kollegen, hatte sie die besondere Aufgabe, nicht nur das eigene Denken, Handeln und Fühlen zu verarbeiten, sondern auch das Tun und die Gefühle anderer zu »spiegeln«.

Menschen spüren ähnlich wie Affen, was in anderen vor sich geht, weil bestimmte Nervenzellen bei ihnen genau dieselben Gefühle und Programme auslösen, wie wenn sie sich selbst in dieser Situation befinden. Diese Resonanz sei der Schlüssel zu Empathie, Intuition und zwischenmenschlicher Kommunikation, so die Grundthese des Buches.

Bauer schildert Experimente des amerikanischen Forschers Andrew Meltzoff: Bereits nach wenigen Tagen fängt ein Säugling an, das Verhalten seiner Eltern zu imitieren. Öffnet die Mutter den Mund, tut dies auch ihr Baby, spitzt sie die Lippen, kräuselt sie auch der Nachwuchs, streckt sie ihm die Zunge heraus, antwortet der Spross mit derselben Mimik. »Zwischen dem Neugeborenen und der Hauptbezugsperson beginnt … etwas, dessen Zauber nur noch mit der Situation von Frischverliebten zu vergleichen ist.« Denn dieser »Tanz« von Mutter und Kind führe zur Ausschüttung körpereigener Opioide und schaffe die Grundlage für emotionale Intelligenz und soziale Identität.

Ohne die Arbeit der Spiegelneurone, so die These des Autors, könnten wir niemals im dichten Gedränge eines Supermarkts dem dicken Mann am Nachbarregal ausweichen oder unseren ▷

Auf Deutsch erschienen

Bengt Beckman

Arne Beurling und Hitlers Geheimschreiber

Schwedische Entzifferungserfolge im 2. Weltkrieg

Springer, Berlin 2006. 323 Seiten, € 39,35

ist die deutsche Version von »Codebreakers. Arne Beurling and the Swedish Crypto Program during World War II« (Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 98).

▷ Partner erkennen, wenn wir nur den Schatten seiner Gestalt oder seiner Bewegungen erahnen. Liebe und Flirt seien ohne die intelligenten Zellen undenkbar. Schließlich liege das Wesen der Liebe in einem Einschwingen auf einen gemeinsamen Aufmerksamkeitsfokus begründet: »Ich fühle, was du fühlst.«

Seit der Entdeckung der Spiegelneurone, die der renommierte Neurowissenschaftler Vilayanur S. Ramachandran als ähnlich bedeutenden Durchbruch pries wie das Aufspüren der DNA, haben die Forscher ihnen viel Aufmerksamkeit gewidmet. So wurde in der Fachwelt etwa die Entwicklung der Sprache mit ihnen in Verbindung gebracht, es gab aktuelle Untersuchungen zum Autismus oder zum Nachvollziehen von Schmerzempfinden. Übereinstimmend identifizierten viele Wissenschaftler die Spiegelneurone als wichtige Funktionsträger bei komplexen kognitiven Prozessen wie etwa bei Empathie und Intuition. Und auch ihr Entdecker Rizzolatti hat vor Kurzem in der Zeitschrift »Science« einen neuen Überblick über ihr Wirken gegeben (Bd. 308, S. 662, 29. April 2005).

Joachim Bauer trifft im Wortsinn einen Nerv: Es beleuchtet ein spannendes Thema, das viel Potenzial für weitere Forschung bietet. Sein Buch ist verständlich geschrieben und gut nachvollziehbar.

Allerdings bleibt der Autor über weite Strecken zu sehr im Allgemeinen. Wo er Alltagsbeispiele und Geschichten einflicht, wirkt das Buch sofort viel lebendiger; aber diese Stellen sind selten. Allzu leicht verliert sich der Autor in Abhandlungen etwa über Gewalt im Fernsehen oder das Verhalten in problematischen Beziehungen. Zudem bricht er interessante Gedankengänge und Aspekte oft gerade dann ab, wenn es spannend wird, so etwa in seinem Kapitel über Autismus oder über Intersubjektivität und Ethik. Hinweise auf Fachbücher und neue Studien beziehungsweise genaue Versuchsanordnungen tauchen nur am Rand auf. Wer in die Tiefe gehen möchte, muss sich an die Hinweise in der Literaturliste halten.

Dennoch: Lesern, die sich für das Thema interessieren und ein bisschen »reinschnuppern« möchten, sei Bauers Buch als Einstiegslektüre durchaus empfohlen.

Stephanie Hügler

Die Rezensentin ist Soziologin und Psychologin und lebt als freie Journalistin in Heidelberg.

BOTANIK

Ruprecht Düll und Herfried Kutzelnigg

Taschenlexikon der Pflanzen Deutschlands

Ein botanisch-ökologischer Exkursionsbegleiter

6. Auflage, Quelle & Meyer, Wiebelsheim 2005. 577 Seiten, € 24,95

Dieses Pflanzenbuch bietet mehr über seine Objekte als die nackte Beschreibung, wie man sie in den üblichen Pflanzenführern und Bestimmungsbüchern findet. Von etwa 500 in Deutschland vorkommenden Farn- und Samenpflanzenarten haben die Autoren Wissenwertes über Namen, Vorkommen, Kulturgeschichte und Verwendung zusammengetragen. Ruprecht Düll, emeritierter Botanikprofessor in Duisburg und Autor zahlreicher Botanikbücher, und Herfried Kutzelnigg, Akademischer Oberrat im Fachgebiet Botanik, sind intime Kenner und Liebhaber der einheimischen Flora.

Die obligate Pflanzenbeschreibung erschöpft sich nicht in der Auflistung von Zahlen, sondern ist mit interessanten Zusatzinformationen, Farbfotos und Detailzeichnungen angereichert. Piktogramme weisen auf Eigenschaften wie Giftigkeit, Verwendungszweck und Schutzstatus hin. Zusätzlich zu den 500 »Leitarten« werden 600 ähnliche oder nahe verwandte Spezies in Kurztexten beschrieben.

Der zentrale Teil mit den Einzelbeschreibungen wird eingerahmt einerseits

Die blauschwarzen Früchte der Kanadischen Felsenbirne *Amelanchier lamarckii* (links) sind sehr schmackhaft (»ostfriesische Korinthen«); der Glatthafer *Arrhenatherum elatius* (Mitte) verbreitet sich unter anderem dadurch, dass sich die hygroskopische, korkenzieherartig gewundene Granne in den Boden bohrt; der Acker-Schachtelhalm *Equisetum arvense* hat den höchsten Kieselsäuregehalt aller Gefäßpflanzen.

Bakterien

Von Paul von der Heyde

Die Bakterien des Gentechnikers Heinz Eller teilen sich eigentlich in jeder Nacht genau einmal. Vor einiger Zeit setzte Eller das erste frisch konstruierte Bakterium dieser Art in eine Nährlösung und protokollierte seither jeweils mittags die Anzahl. Die nächtliche Teilung verlief aber nicht jede Nacht ganz regelmäßig. Nicht selten stellte Eller beim Nachzählen fest, dass am vorangegangenen Tag jeweils genau ein Bakterium die Fähigkeit zur Teilung dauerhaft verloren hatte. Überlebt hatten sie allerdings alle. Gestern zählte er insgesamt 1638 Bakterien, heute waren es 3245.

Vor wie vielen Tagen setzte Eller das erste Bakterium in die Nährlösung?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zwei Einkaufskörbe »Carry Bag«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11.4. 2006, eingehen.

Lösungen zu »Gleichungen kreuz und quer« (Februar 2005)

16	+	13	–	15	=	14
+		–		+		–
4	+	9	–	3	=	10
–		+		–		+
12	+	1	–	11	=	2
=		=		=		=
8	+	5	–	7	=	6

Die beiden hier abgedruckten Lösungen stammen von Daniel Mader aus München. Beim linken Kreuzzahlrätsel gibt es insgesamt 20 352, beim rechten 91 unterschiedliche Lösungen, wie einige Rätsellöser durch erschöpfende Computersuche herausfanden.

Die Gewinner der drei Armbanduhren »Spektrum« sind Eduard Reisacher, Bollschweil; Ulrich Siebenmorgen, Königsbach-Stein; und Hubert Fischer, Algund (Südtirol).

16	–	15	+	12	=	13
·						–
1	·	11	–	9	=	2
–						–
6	:	3	+	5	=	7
=						=
10	+	8	–	14	=	4

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

von einem allgemeinen Teil über Lebensform-, Bestäubungs- und Ausbreitungstypen, andererseits von diversen Auflistungen nach Blühzeitpunkt, besonderer Giftigkeit, systematischer Einordnung, Lebensräumen und Verwendungszweck sowie einem Literaturverzeichnis und einem Glossar. Eine kurze Einführung dokumentiert das Anliegen der Autoren, dem Leser die Pflanze als (schönes!) Lebewesen näher zu bringen, und gibt nützliche Hinweise zur Gestaltung von pflanzenkundlichen Exkursionen.

Dies ist ein Pflanzenbuch, das man nicht im Rucksack mitschleppt (zu Recht heißt es nicht mehr »Exkursionstaschenbuch« im Haupttitel), sondern lieber genüsslich auf dem Sofa bei einer Tasse Tee liest. Gegenüber den vorherigen Ausgaben hat das Buch in dieser Neuauflage durch Glanzpapier, schöne Farbfotos und farbige Gliederungshilfen deutlich gewonnen.

Vorwürfe sind dem Werk höchstens in gestalterischer Hinsicht zu machen: Vermutlich aus Platzgründen steht der Name jeder Pflanze samt Zubehör neben statt über der Pflanzenabbildung. Außerdem steht hinter dem lateinischen Pflanzennamen der Name des Autors nicht mehr abgekürzt (zum Beispiel L. für Linnaeus), sondern ausgeschrieben, sodass jede Pflanzenbeschreibung mit lateinischem Namen, lateinischen Synonymen, voll ausgeschriebenem Autorennamen, deutschem Namen und der Familienbezeichnung auf Lateinisch und Deutsch übertitelt ist. Dies ergibt bis zu achtzeilige Textwüsten, aus denen man die Informationen mühsam heraussuchen muss.

Die einleitenden Kapitel sind ohne jegliche Abbildung – schade, denn gerade bei diesen ziemlich trockenen Ausführungen über Lebensform-, Bestäubungs- und Ausbreitungstypen wären Illustrationen für den ungeübten Laien Gold wert gewesen. Die im Anhang aufgeführten Listen sind von fraglichem Nutzen. Wozu muss der Leser alles über die Giftigkeit der verschiedensten Pflanzen noch einmal an dieser Stelle zusammengefasst haben?

Das sind jedoch rein äußerliche Mängel. Es bleibt der wesentliche Vorzug, dass man in dem Buch Dinge erfährt, die in Bestimmungsbüchern nicht zu finden sind.

Frank Thommen

Der Rezensent ist Diplom-Naturwissenschafter, hat über systematische Botanik geforscht und Exkursionen geführt. Er arbeitet als Systemadministrator an der ETH Zürich.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Bakterien

Von Paul von der Heyde

Die Bakterien des Gentechnikers Heinz Eller teilen sich eigentlich in jeder Nacht genau einmal. Vor einiger Zeit setzte Eller das erste frisch konstruierte Bakterium dieser Art in eine Nährlösung und protokollierte seither jeweils mittags die Anzahl. Die nächtliche Teilung verlief aber nicht jede Nacht ganz regelmäßig. Nicht selten stellte Eller beim Nachzählen fest, dass am vorangegangenen Tag jeweils genau ein Bakterium die Fähigkeit zur Teilung dauerhaft verloren hatte. Überlebt hatten sie allerdings alle. Gestern zählte er insgesamt 1638 Bakterien, heute waren es 3245.

Vor wie vielen Tagen setzte Eller das erste Bakterium in die Nährlösung?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zwei Einkaufskörbe »Carry Bag«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11.4. 2006, eingehen.

Lösungen zu »Gleichungen kreuz und quer« (Februar 2005)

16	+	13	–	15	=	14
+		–		+		–
4	+	9	–	3	=	10
–		+		–		+
12	+	1	–	11	=	2
=		=		=		=
8	+	5	–	7	=	6

Die beiden hier abgedruckten Lösungen stammen von Daniel Mader aus München. Beim linken Kreuzzahlrätsel gibt es insgesamt 20 352, beim rechten 91 unterschiedliche Lösungen, wie einige Rätsellöser durch erschöpfende Computersuche herausfanden.

Die Gewinner der drei Armbanduhren »Spektrum« sind Eduard Reisacher, Bollschweil; Ulrich Siebenmorgen, Königsbach-Stein; und Hubert Fischer, Algund (Südtirol).

16	–	15	+	12	=	13
·						–
1	·	11	–	9	=	2
–						–
6	:	3	+	5	=	7
=						=
10	+	8	–	14	=	4

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

von einem allgemeinen Teil über Lebensform-, Bestäubungs- und Ausbreitungstypen, andererseits von diversen Auflistungen nach Blühzeitpunkt, besonderer Giftigkeit, systematischer Einordnung, Lebensräumen und Verwendungszweck sowie einem Literaturverzeichnis und einem Glossar. Eine kurze Einführung dokumentiert das Anliegen der Autoren, dem Leser die Pflanze als (schönes!) Lebewesen näher zu bringen, und gibt nützliche Hinweise zur Gestaltung von pflanzenkundlichen Exkursionen.

Dies ist ein Pflanzenbuch, das man nicht im Rucksack mitschleppt (zu Recht heißt es nicht mehr »Exkursionstaschenbuch« im Haupttitel), sondern lieber genüsslich auf dem Sofa bei einer Tasse Tee liest. Gegenüber den vorherigen Ausgaben hat das Buch in dieser Neuauflage durch Glanzpapier, schöne Farbfotos und farbige Gliederungshilfen deutlich gewonnen.

Vorwürfe sind dem Werk höchstens in gestalterischer Hinsicht zu machen: Vermutlich aus Platzgründen steht der Name jeder Pflanze samt Zubehör neben statt über der Pflanzenabbildung. Außerdem steht hinter dem lateinischen Pflanzennamen der Name des Autors nicht mehr abgekürzt (zum Beispiel L. für Linnaeus), sondern ausgeschrieben, sodass jede Pflanzenbeschreibung mit lateinischem Namen, lateinischen Synonymen, voll ausgeschriebenem Autorennamen, deutschem Namen und der Familienbezeichnung auf Lateinisch und Deutsch übertitelt ist. Dies ergibt bis zu achtzeilige Textwüsten, aus denen man die Informationen mühsam heraussuchen muss.

Die einleitenden Kapitel sind ohne jegliche Abbildung – schade, denn gerade bei diesen ziemlich trockenen Ausführungen über Lebensform-, Bestäubungs- und Ausbreitungstypen wären Illustrationen für den ungeübten Laien Gold wert gewesen. Die im Anhang aufgeführten Listen sind von fraglichem Nutzen. Wozu muss der Leser alles über die Giftigkeit der verschiedensten Pflanzen noch einmal an dieser Stelle zusammengefasst haben?

Das sind jedoch rein äußerliche Mängel. Es bleibt der wesentliche Vorzug, dass man in dem Buch Dinge erfährt, die in Bestimmungsbüchern nicht zu finden sind.

Frank Thommen

Der Rezensent ist Diplom-Naturwissenschafter, hat über systematische Botanik geforscht und Exkursionen geführt. Er arbeitet als Systemadministrator an der ETH Zürich.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Das Antiparallelogramm (I)

Was haben ellipsenförmige Zahnräder, die exakte optische Fokussierung, die Lemniskate und Watts Dampfmaschine miteinander gemeinsam? Ein ziemlich einfaches Viereck, das aber in der Schule kaum vorkommt

Von Norbert Treitz

Was ist ein ebenes Viereck *ABCD*, bei dem zwei Paare nicht benachbarter Seiten gleich sind, also $\overline{AB} = \overline{CD}$ und $\overline{BC} = \overline{DA}$? Ein Parallelogramm? Richtig, aber das ist nicht die einzige Antwort. Wenn sich die Seiten überkreuzen, dann ist es ein so genanntes Antiparallelogramm, und seine Seiten sind im Allgemeinen nicht mehr parallel. Immerhin sind seine langen Seiten, sagen wir *BC* und *DA*, die Diagonalen eines gleichschenkligen Trapezes und die kurzen Seiten *AB* und *CD* dessen Schenkel; parallel sind die Verbindungslinien *AC* und *BD*, die nicht Seiten des Vierecks sind.

Stellen wir uns jetzt das Antiparallelogramm als ebenes Gelenkviereck vor, das heißt mit festen Seitenlängen, aber variablen Winkeln. Das ist mit vier Lochstäben, vier Schrauben und acht Muttern (zum Kontern) aus einem Metallbaukasten zu realisieren (Bild rechts); mit Unterlegscheiben an geeigneten Stellen kann man einer Ecke den Weg über eine Stange hinweg erleichtern. Rabiate Menschen biegen die Lochstäbe zu diesem Zweck leicht in die dritte Dimension.

Wir betrachten nun nur solche Bewegungen, bei denen unser Viereck nicht zum Parallelogramm wird. Es hat dann in jeder Position Klappsymmetrie wie ein Schmetterling, wobei die Symmetrieachse durch den Schnittpunkt der beiden längeren Seiten *BC* und *DA* geht.

Halten wir eine kurze Seite (zum Beispiel *AB*) fest, so wandert *C* auf einem Kreis um *B* und *D* auf einem ebenso großen um *A*. Zugleich wandert der Schnittpunkt *E* der längeren Seiten auf einer gewissen Kurve um *A* und *B* herum. Aus der Schmetterlingssymmetrie folgt stets $\overline{AE} + \overline{BE} = \overline{AD}$: Unsere Kurve ist die Menge aller Punkte, für welche die Summe der Abstände von *A* und *B* gleich der Konstanten $\overline{AD}$ ist. Das ist eine Ellipse! Es gilt $\overline{AD} = 2a$, wobei *a* die große Halbachse ist, und $\overline{AB} = 2e$; dabei heißt *e* die lineare Exzentrizität der Ellipse. Schon den Griechen der Antike bekannt und als einer der Kegelschnitte intensiv studiert, gewann sie an Bedeutung in der Physik, seit Johannes Kepler die elliptische Bewegung der Planeten um die Sonne fand, und wurde später zur Lieblingskurve der barocken Baumeister.

Die Landschaftsgärtner jener Zeit haben ein bereits in der Antike bekanntes Konstruktionsverfahren für die Ellipse wiederentdeckt: Man schlage an den Punkten *A* und *B* (den »Brennpunkten«) Pflöcke in den Boden, werfe eine zum Ring geknotete Schnur geeigneter Länge über die Pflöcke und einen Spaten und steche mit diesem bei gespannter Schnur den Umriss der Ellipse ab. Unsere Konstruktion über das Antiparallelogramm ist eine Version dieser Gärtnerkonstruktion. Die Länge $2a$ der großen Achse ist die lange Seite des Antiparallelogramms; die kurze ist gleich dem Abstand $2e$ der Brennpunkte.

Heften wir nun eine zweite, gleiche Ellipse mit den Brennpunkten an die Punkte *C* und *D* unseres Gelenkvierecks, so rollen beide Ellipsen aneinander ab. Man könnte ihre Ränder mit Zähnen versehen. Hält man eins der beiden elliptischen Zahnräder fest, so läuft jeder Brennpunkt des beweglichen Zahnrads auf einem Kreis um einen Brennpunkt des festen. Allerdings hat höchstens einer von beiden konstante Winkelgeschwindigkeit (außer wenn die Ellipsen Kreise sind), der andere geht fast so ungleichmäßig wie ein Malteserkreuz.

Anschmiegsame Ellipsen

Die Symmetrieachse der gesamten Anordnung ist in jeder Position die gemeinsame Tangente der Ellipsen im Berührpunkt. Da diese Gerade stets eine Winkelhalbierende zwischen den langen Seiten bildet, tut die zu ihr rechtwinklige Gerade das ebenfalls, halbiert also die Winkel *AEB* und *CED*.

Wer in einem Saal mit annähernd elliptischem Grundriss in einem Brennpunkt der Ellipse flüstert, wird im anderen Brennpunkt hervorragend verstanden, weil die Schallwellen es auf jedem beliebigen Weg vom Flüsterer über die Reflexion an der Wand zum Hörer gleich

Zwei Ellipsen rollen präzise aneinander ab, geführt durch ein Antiparallelogramm-Gestänge ...

weit haben und deswegen dort mit gleicher Phasenlage eintreffen; denn die Summe der Abstände von den Brennpunkten ist eine Konstante. Das gilt auch und vor allem dann, wenn man die Ellipse durch Rotation um ihre lange Achse zum (gestreckten) Rotationsellipsoid (»Flüstergewölbe«) ausbaut.

Was dem Schall recht ist, das ist dem Licht billig. Eine Kerzenflamme im einen Brennpunkt heizt den anderen gehörig auf: Die Brennpunkte tragen ihren Namen zu Recht. Wer es vorzieht, dem Weg des Lichts mit der Strahlenoptik zu folgen – geradlinige Ausbreitung im homogenen Medium, Reflexion symmetrisch zum Einfallslot und Ablenkung entsprechend dem Brechungsgesetz –, kommt zum selben Ergebnis, indem er die Symmetrie des Antiparallelogramms zur gemeinsamen Tangente der beiden Ellipsen ausnutzt. Ein Strahl von einem Brennpunkt läuft nach regulärer Reflexion durch den anderen (Bild S. 116).

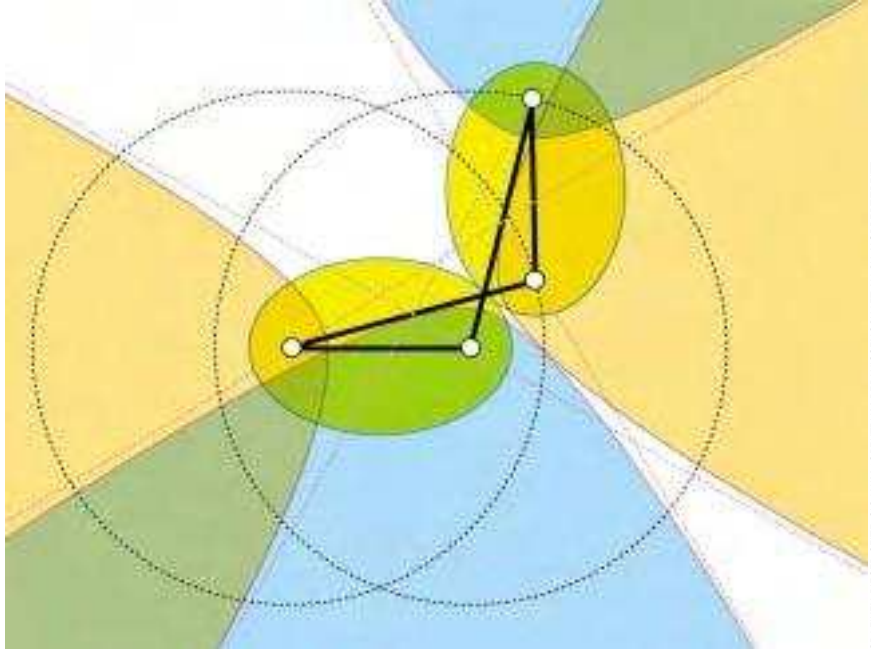
Ein Hohlspiegel in Form eines Ellipsoids realisiert also eine exakte Abbildung von einem Objektpunkt zu einem reellen Bildpunkt und hat damit seinem viel »regelmäßigeren« Gegenstück, der Kugel, etwas voraus; denn ein Hohlspiegel in Form einer Kugelschale kann exakt nur den Kugelmittelpunkt in sich selbst abbilden. Dass er auf halbem Weg zwischen seinem Scheitel und dem Mittelpunkt einen Brennpunkt habe, ist mehr Wunsch als Wirklichkeit: Für schmale Parallelbündel aus dem Unendlichen wird der Brennfleck hinreichend klein, und für wechselnde Einfallsrichtungen gibt es eine ganze (Halb-)Kugelfläche solcher Fast-Brennpunkte.

Für exakte Abbildungen aus dem Unendlichen muss man zum anderen Grenzfall der Ellipse übergehen. Nicht der Kreis, sondern die Parabel liefert – zur Rotationsfläche erweitert – das Gewünschte. Das Rotationsparaboloid ist der Grenzfall eines Ellipsoids mit unendlichen a und e, aber endlichem $a - e$. Es bildet daher einen unendlich fernen Punkt auf der Innenseite seiner Symmetrieachse so exakt in seinen Brennpunkt ab, wie es die Wellenlänge gestattet. (Astronomische Objekte kann man in sehr guter Näherung als unendlich fern ansehen.) Alle anderen Tätigkeiten des Paraboloids sind nur näherungsweise exakt.

Beim Übergang vom Ellipsoid zum Paraboloid wandert ein Brennpunkt ins Unendliche aus – und kommt »von minus unendlich« wieder, wenn man über das Paraboloid hinaus zum zweischaligen Rotationshyperboloid übergeht. Allerdings ist das Bild unter der nach wie vor exakten Abbildung von Brennpunkt zu Brennpunkt jetzt ein virtuelles. Das hat 1672 der französische Priester Laurent Cassegrain (um 1629–1693) zur Konstruktion eines Zwei-Spiegel-Teleskops benutzt: Der Hauptspiegel ist ein Paraboloid, in dessen Brennpunkt der Brennpunkt einer auf ihrer konvexen Seite spiegelnden und zum Paraboloid koaxialen Hyperboloidschale sitzt. Deren ▷

... das unsichtbar bleibt, weil der Kreuzungspunkt stets mit dem Berührpunkt der Ellipsen zusammenfällt.

FOTOS DIESER DOPPELSEITE: KIRSTEN WAGENBRENNER / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



GRAFIKEN DIESER SEITE: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: NORBERT TREITZ

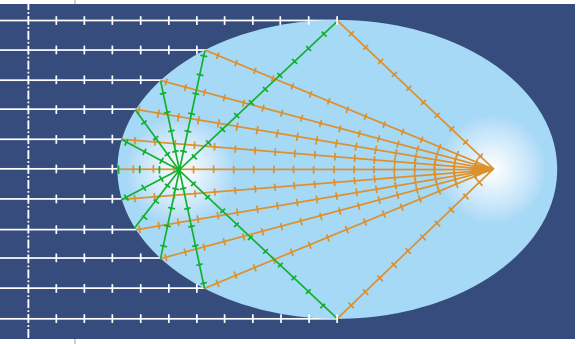
Nicht nur zwei Ellipsen, auch zwei Hyperbeln rollen, durch das Antiparallelogramm geführt, aneinander ab.

anderer Brennpunkt liegt auf der Achse, aber jenseits des Parabolspiegels, der aus diesem Grund in der Mitte eine Öffnung hat. Damit wird die effektive Brennweite des Fernrohrs erheblich vergrößert, analog zu der als Telekonverter benutzbaren Zerstreuungslinse, die man zwischen eine Kamera und ein Normal- oder zu schwaches Teleobjektiv setzen kann.

Mit den exakten Abbildungen durch Reflexionen ist es also nicht weit her. Es gibt sie nur zwischen den beiden Brennpunkten eines Kegelschnitts beziehungsweise der Fläche, die man durch Rotation des Kegelschnitts um seine durch die Brennpunkte gehende Achse erzeugen kann: Ellipsoid und Hyperboloid mit Paraboloid und Kugel als Grenzfällen.

Mit der Brechung sieht es nicht unbedingt besser aus: Sphärische, das heißt von Kugelschalen begrenzte Linsen haben überhaupt nur näherungsweise Brennpunkte, wofür ihnen Bezeichnungen wie »Linsenfehler« auch noch die Schuld in die Schuhe schieben. Kann man denn mit Brechung wenigstens einen »unendlich fernen« Punkt exakt in einen Punkt abbilden? So genau, wie es die Wellenoptik zulässt und die Strahlenoptik im Fall der genannten Spiegel behauptet? Es geht, und wieder vollbringt das Ellipsoid das Wunder.

Eine ellipsoidförmige Linse bildet einen unendlich fernen Punkt exakt in ihr Inneres ab. Die strichpunktierte Linie links bezeichnet die Leitebene. Von ihr aus bis zum Eintritt des Strahls in das Ellipsoid ist es *n*-mal so weit wie vom linken Brennpunkt zur Eintrittsstelle (*n* ist die Brechzahl). Das Licht vom unendlichen fernen Punkt schwingt also an jeder Stelle synchron mit einer gedachten Lichtwelle (grün), die im linken Brennpunkt ihren punktförmigen Ursprung hat, und wird wie diese exakt im rechten Brennpunkt fokussiert (orange).



Eine Parabel besteht aus den Punkten, die von einer gegebenen (»Leit«-) Geraden den gleichen Abstand haben wie von einem festen (»Brenn«-)Punkt. Verlangt man nun statt des gleichen Abstands ein festes Verhältnis der Abstände, bekommt man statt der Parabel einen Ellipsen- oder Hyperbelbogen. Das vorgegebene Verhältnis findet sich dabei als das zwischen dem Abstand $2e$ beider Bennpunkte und dem Abstand $2a$ beider Hauptscheitel wieder. Und dieses feste Verhältnis muss gleich der so genannten Brechzahl sein, das heißt gleich dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in Luft und Glas. Genau dann sind es nämlich von der Leitebene bis zum Eintrittspunkt in die »Linse« ebenso viele Wellenlängen wie vom näher gelegenen Brennpunkt des Ellipsoids bis zu diesem Eintrittspunkt. Der andere Brennpunkt ist daher der gesuchte Bildpunkt (Bild links). Obwohl das seit Descartes bekannt ist, findet man es in Physikbüchern eher selten (siehe Literaturhinweise: Langkau, Lindström und Scobel).

Bisher hatten wir die vier Ecken des Antiparallelogramms als Brennpunkte zweier Ellipsen benutzt, wobei die kurzen Seiten als Brennpunktsabstände und die langen als ihre großen Achsen, also Scheitelabstände, auftreten. Nun drehen wir den Spieß um und ernennen die Länge der langen Seite zum Brennpunktsabstand und die der kurzen zum Scheitelabstand. Die Kegelschnitte mit diesem Inventar sind Hyperbeln. Bei der Bewegung des Antiparallelogramms rollen auch sie aneinander ab, wobei sie allerdings mit den anderen beiden Beinen (Halbästen) übereinander streichen können. Zugleich rollen auch die Ellipsen aneinander ab (Bild oben). Zu dem Spezialfall der rechtwinkligen oder gleichseitigen Hyperbel (mit $e^2 = 2a^2$, also $a = b$ und der Asymptotensteigung $b/a = 1$) gehört nicht etwa der Kreis, sondern die spezielle Ellipse mit $\sqrt{2}$ als Achsenverhältnis, also mit $b = e$, bei der die Brennpunkte und die Nebenscheitel ein Quadrat bilden.

Damit sind die Fähigkeiten des Antiparallelogramms noch lange nicht erschöpft! Im nächsten Monat werden wir sehen, wie unser Gelenkviereck als Umwandler von geraden in kreisförmige Bewegungen, insbesondere für Dampfmaschinen und ähnliche Geräte, nützliche Dienste leistet. ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Physik kompakt: Elektromagnetische Wellen. Von Rudolf Langkau, Gunnar Lindström und Wolfgang Scobel. Vieweg, Braunschweig 1996; S. 221

Refraction properties of conics. Von David Mountford in: Mathematical Gazette, Bd. 68, S. 134, 1984

Weblinks zu diesem Thema sowie bewegte Bilder zu den abrollenden Ellipsen finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Hookes Fossilien und die Anti-Evolutionisten

Im 17. Jahrhundert begann ein Streit um das Alter der Erde und die Entwicklung der Organismen, den hartnäckige Evolutionsgegner bis zum heutigen Tag fortsetzen.

Von Keith Stewart Thomson

Gelegentlich erfahre ich, dass aus meinen Beiträgen zur Evolutionstheorie zitiert wurde, um damit gegen die biologische Evolution und für den Kreationismus zu argumentieren. Kürzlich verwendete das so genannte Discovery Institute meine Arbeit bei einem Versuch, den Kreationismus in den Schulen des US-Bundesstaats Ohio zu etablieren. Bei solchen Anlässen weiß man nie, ob man lachen oder weinen soll. Diese Leute durchstöbern die Wissenschaft nur so eifrig, um sie gegen uns zu wenden. Doch letztlich setzen sie einen prinzipiellen Kampf um unsere Herzen und Hirne fort, der niemals wirklich enden wird: Lässt sich das Universum zur Gänze wissenschaftlich erklären oder gibt es ein letztes, nicht erkennbares Mysterium?

»Alles kommt darauf an, das Auge auf die Naturtatsachen zu richten«

Ein Geburtshelfer unseres Zeitalters der Evolution war Robert Hooke (1635–1703) – eine Leuchte in einer brillanten Ära. Er hatte Zeitgenossen wie Robert Boyle, Christopher Wren, Anton van Leeuwenhoek, Gottfried Wilhelm Leibniz und natürlich Isaac Newton. Ihre Arbeit stand unter dem Einfluss von Francis Bacon (1561–1626), der mit der mittelalterlichen Auffassung von Wissenschaft radikal gebrochen hatte. Die Wahrheit, was immer sie sei, und wie gut sie sich auch verberge, sollte nicht durch biblische Erleuchtung oder bischöfliche Exegese gesucht werden, auch nicht in der Autorität antiker Gelehrter wie Aristoteles. Vielmehr gelte für den modernen Gelehrten: »Alles kommt darauf an, das Auge unbeirrt auf die Naturtatsachen zu richten und dadurch ihre Bilder einfach so, wie sie sind, zu empfangen.«

In gewisser Hinsicht ist Hooke am bekanntesten als Hälfte eines der großen »seltsamen Paare« der Wissenschaft. Da die Familie arm war, musste Hooke als Diener arbeiten, um das Studium in Oxford bezahlen zu können. Robert Boyle hingegen war der reiche Sohn des noch reicheren ersten Earl of Cork und besuchte nie eine Universität. Als Boyle sich zwischen 1656 und 1668 in Oxford niederließ, stellte er Hooke an, damit der ihm bei seinen philosophischen Untersuchungen über das Wesen der Gase und deren Gesetze zur Hand ginge. Hooke war der Erfinder und Techniker, der die berühmten Luftpumpenversuche durchführte; sie bewiesen, dass es in der Luft einen – später entdeckten und Sauerstoff genannten – Faktor geben muss, den Tiere zum Leben brauchen.

Hookes Erfindungen reichten später von der Uhrfeder bis zum Universalgelenk. Er wurde Bauaufseher für London, als Christopher Wren dort Stadtarchitekt war, und gemeinsam gestalteten sie nach dem großen Brand von 1666 London neu. Hooke und Wren arbeiteten mit Mikroskopen, und aus Beobachtungen grober Dünnschnitte von Kork entwickelte Hooke den Begriff »Zelle«.

Gefährliche Ideen

In seinem großen Werk »Micrographia« publizierte Hooke 1665 wichtige Gedanken über Fossilien. Wie Leonardo da Vinci und viele antike Autoren schloss er, dies müssten versteinerte Überbleibsel einst lebender Organismen sein. Mit seinen »Vorlesungen und Diskursen über Erdbeben und unterirdische Eruptionen« (1668–1700) erschloss er eine ganze Welt wissenschaftlicher Erklärungen für die Erdgeschichte und skizzierte sogar die Grundlagen eines Gesteinszyklus, mehr als hundert Jahre vor James Hutton.

Wie konnte jemand im England der Restauration ungestraft so gefährliche Ideen über Fossilien und Erdgeschichte vorbringen? Ganz einfach: Hookes Geologie war nicht genügend ausgereift und die Resonanz auf seine Schriften zu schwach, um die Mächte der Religion allzu sehr in Argwohn und Unruhe zu versetzen. Heute wiederum ist das Faktum einer al-

ten und sich wandelnden Erde so fest etabliert, dass die allmähliche Evolution des Lebens auf der Erde fast unweigerlich daraus zu folgen scheint. Die Bissigkeit der modernen Anti-Evolutionisten rührt gewiss nicht nur von ihrer Zugehörigkeit zu einem speziellen Zweig des religiösen Fundamentalismus her, sondern auch von der Tatsache, dass die Evolution nun eine ausgewachsene Wissenschaft ist, nicht bloß eine angreifbare Hypothese.

Vor Hooke und seinen Zeitgenossen Steno (Nicolaus Stenson, der 1669 seinen Klassiker »Prodromus« veröffentlichte) und John Ray (»Three Physico-Theological Discourses«, 1692) blieb das Wesen der Fossilien zu Recht zweifelhaft. Erst die Qualität der fossilen Funde, die Hooke in »Micrographia« und »Erdbeben« beschrieb, zwang zu der Schlussfolgerung, dass sie Resultate eines Prozesses sind: »Die Tiere oder pflanzlichen Substanzen, die sie darstellen, wurden in Stein verwandelt, indem ihre Poren durch eine versteinernde flüssige Substanz gefüllt wurden …«

Meeresmuscheln im Gebirge

Die meisten Fossilien stammen nicht von heute existierenden Arten; daraus schloss Hooke, dass manche Lebensformen ausgestorben sind – im Widerspruch zum Alten Testament, insbesondere Genesis, Kapitel 1, Vers 25. Hooke verwarf die Idee, Fossilien seien einfach Indizien für die Sintflut, und folgerte, die Erde müsse viel älter sein als die 6000 Jahre, die Bischof Ussher 1650 aus Kalendern und biblischen Chronologien hergeleitet hatte: »Ich halte für einleuchtend, dass dies nicht von der Sintflut stammen kann, denn deren Dauer von nur rund zweihundert natürlichen Tagen oder einem halben Jahr böte nicht genug Zeit für die Produktion und Perfektion so vieler großer und ausgewachsener Muschelschalen … Außerdem besagt die Menge und Dicke der Sandschichten, mit denen sie oftmals vermischt auftreten, dass über ihnen viel länger Meer gelegen haben muss …«

Fossilien waren oft »Meeresmuscheln«, die auf Bergen gefunden wurden, weit über dem Meeresspiegel. Wie Hooke erkannte, werden heutige Landschaftsformen fortwährend erodiert, und der entstehende Kies, Sand und Schlamm werden zum Meer gespült. Er begriff, dass die Erde aus den schichtweise abgelagerten Überresten verschiedener Zeitalter besteht; darum kann die Erosion sich nicht über Äonen ungestört fortgesetzt haben. Es muss einen Prozess gegeben haben, der »die Erhebung sehr beträchtlicher Berge aus einem ebenen und platten Land« verursachte. Als Erklärung erwog Hooke Erdbeben, die Wärme im Erdinnern und Verlagerungen der Erdachse.

KEITH STEWART THOMSON

Solche Fossilien interpretierte Robert Hooke als versteinerte Überreste von einst lebenden Meerestieren. Daraus schloss er auf die Veränderlichkeit der Lebensformen.

Hookes Weltbild widersprach der Bibel: Wandel statt Stillstand, eine alte statt einer jungen Erde, wechselhafte Vielfalt anstelle einmaliger Schöpfung. Hooke spekulierte sogar über die Variabilität der Arten. Wenn manche Arten im Lauf der Erdgeschichte aussterben konnten, erschien ihm logisch, dass »es jetzt verschiedene neue Arten geben mag, die nicht von Anbeginn da waren«. Doch was wir jetzt wissen, war damals Hypothese. Und es herrschte kein Mangel an rivalisierenden Theorien. In Robert Plots »Natural History of Oxford-Shire« (1677) finden wir eine umständliche Wiederholung aller Argumente gegen Hooke und Steno; verteidigt wird die Idee, Fossilien seien bloß *lapides sui generis* – selbst erzeugte Steine. Nach einer gewagten Theorie von Hookes Zeitgenossen Edward Lhwyd entstanden Fossilien aus den »Samen« von Meereswesen; die Keime wurden mit den Wolken vom Meer über Land getragen, wo sie tief im Gestein ausschlüpften. ▷

▷ Hooke und andere Fortschrittsdenker standen vor einem Dilemma: Hätte es schlüssige unabhängige Indizien für das Alter der Erde und das relative Alter der unterschiedlichen fossilreichen Schichten gegeben, dann wären die Fossilien leicht als solche akzeptabel gewesen. Hätten umgekehrt schlüssige unabhängige Indizien für das wahre Wesen der Fossilien und für ihre Entstehungsprozesse existiert, dann hätte man das Alter der Erde hingenommen. Doch wie in den meisten Fällen entwickelten sich beide Seiten des Problems schrittweise: hier ein Fortschritt, dort ein Rückzug. Erst die – von Fossilien unabhängige – Gesteinsdatierung mittels Radioisotopen sowie die Entdeckung der Plattentektonik haben das Problem gelöst, obgleich es zweifellos noch viel mehr zu entdecken gibt.

Dieses Henne-oder-Ei-Problem mit unabhängigen Beweisketten gilt ähnlich auch für die moderne Evolutionswissenschaft. Die letzte Schlussfolgerung aus dem Studium der Evolution – und damit der letzte Test dieser Wissenschaft – besagt, dass das Leben durch natürliche Prozesse aus unbelebter Materie hervorging. Einerseits zeigt die Paläontologie schlüssig, dass das Leben sich mit der Zeit gewandelt hat, und genetische Analysen beweisen die Verwandtschaft aller Organismen durch die Aufspaltung der Abstammungslinien. Die drei Grundlagen des Darwin'schen Evolutionsmechanismus – Nachkommenüberschuss, Variation und Selektion – sind in lebenden Populationen leicht nachweisbar. All das führt uns zu der Vorhersage, dass es schließlich möglich sein wird, die Evolution von Belebtem aus Unbelebtem nachzuweisen. Hätten wir andererseits den Zusammenbau selbst replizierender Moleküle aus einfachen nicht selbst replizierenden Molekülen bereits experimentell demonstriert, würden wir daraus bereitwillig auf die allmähliche Evolution der Artenvielfalt schließen.

Interessanterweise kommen Computersimulationen dem Ziel, die Entstehung selbst replizierender Moleküle zu demonstrieren, bereits sehr nahe. Und so geht der schrittweise Prozess der Evolutionsforschung weiter, wobei noch viel Arbeit zu tun bleibt.

Der vorige Absatz bringt mich zu den ersten Zeilen dieses Essays zurück. Im Jahr 1677 nutzte Robert Plot die Tatsache, dass die Fossilien, die wir Ammoniten nennen, »unvollkommene« Versionen des heute lebenden Nautilus sind, als Argument: Darum sei es falsch, Fossilien als Überbleibsel wirklicher Organismen zu interpretieren. Genauso riskiert heutzutage jeder, der einräumt, dass wir die Evolution derzeit nicht vollständig verstehen, den Missbrauch dieser Aussage seitens der Evolutionsgegner: Sie zitieren ihn als Beleg, dass die ganze Theorie aufgelegter Schwindel sei.

200 Jahre nach Hookes »Micrographia« versuchte Philip Henry Gosse einen Damm gegen die drohende Flut des Evolutionismus zu errichten; in seinem Buch »Omphalos« (1857) schuf er das Nonplusultra eines Ad-hoc-Arguments. Der Buchtitel, das griechische Wort für Nabel, bezieht sich auf das alte Rätsel: Hatte Adam einen Nabel? Gosse antwortet mit Ja; Gott schuf einen Adam mit Nabel, und Er erschuf all die Fossilien von Kreaturen, die nie gelebt haben, und die komplexe Struktur der Erde, wie wir sie kennen. Er schuf Bäume mit Jahresringen, die ein Wachstum bezeugen, das nicht stattgefunden hat, Gesteinsschichten, die nie abgelagert worden sind, und Flüsse, die Sedimente von nicht erodierten Hügeln mit sich führen. All die scheinbare Evidenz einer sich wandelnden alten Erde ist einfach ein weiterer Teil von Gottes freizügiger Schöpfung. Dieses Argument ist zwar fast unschlagbar – denn wie will man beweisen, dass es falsch ist –, aber auch purer Unsinn: Was alles erklärt, erklärt gar nichts.

Eine übernatürliche Intelligenz?

Einige moderne Anti-Evolutionisten sind in Gosses Fußstapfen getreten und haben eine neue Version der alten Ad-hoc-Logik entwickelt. Sie gestehen zwar dem, der das möchte, den späteren Verlauf der Evolutionsgeschichte zu, behaupten aber, der Ursprung des Lebens sei nicht durch Evolution erklärbar. Nach dieser Logik stellen komplizierte Makromoleküle wie Hämoglobin eine »irreduzible Komplexität« dar; sie erfordert eine planende Intelligenz *(designing intelligence)*, die mit Gott gleichgesetzt wird. Es fällt schwer, darin eine Wissenschaft zu sehen, denn sie stellt keine prüfbare Hypothese darüber auf, was die planende Intelligenz ist oder wie sie zu erforschen wäre, und sie erfordert den Glauben an eine Negativbehauptung – die Nicht-Entwicklungsfähigkeit komplexer Systeme.

Letztlich krankt auch die »irreduzible Komplexität« an dem oben skizzierten Henne-Ei-Problem. Gäbe es unabhängige wissenschaftliche Beweise für die Existenz Gottes, würde Sein Eingriff in die Natur eher akzeptiert werden. Wäre die Nicht-Entwicklungsfähigkeit komplexer Moleküle irgendwie bewiesen, gäbe es mehr Unterstützung für eine übernatürliche »Intelligenz«. Doch die Möglichkeit des einen spricht nicht für die Wahrscheinlichkeit des anderen. Und nichts davon gleicht der hartnäckigen Suche nach Erklärungen für materielle Phänomene, die Hooke und seine Zeitgenossen uns vorexerziert haben und die wir Naturwissenschaft nennen. ◁

»Gott erschuf all die Fossilien von Kreaturen, die niemals gelebt haben«

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Keith S. Thomson ist Direktor des Museum of Natural History der Universität Oxford.

© American Scientist (www.americanscientist.org)

Micrographia. Von Robert Hooke. Cramer, Baunschweig 1961

The man who knew too much: The strange and inventive life of Robert Hooke. Von Stephen Inwood. Macmillan, London 2002

Booting up life. Von Gerald F. Joyce in: Nature, Bd. 420, S. 278, 2002

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.